INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2015 InvestigacionyCiencia.es

RADIACTIVIDAD
El impacto ecológico de Fukushima

ASTROFÍSICA
El enigma de los púlsares ausentes

SOSTENIBILIDAD
Acuicultura del siglo XXI

MEDICINA BIOELECTRÓNICA | ACUICULTURA SOSTENIBLE | LOS PÚLSARES AUSENTES

Electricidad que cura

La estimulación eléctrica abre nuevas vías en el tratamiento de enfermedades inflamatorias y autoinmunitarias

JUNIO 2015 N.° 465



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Junio 2015, Número 465

30

THINKSTOCK/PLANCTONVIDEO

ARTÍCULOS







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Un sistema inmunitario hiperactivo puede dar lugar a una reacción inflamatoria excesiva en los órganos. Esta es detectada por el sistema nervioso, que intenta atenuar la reacción inmunitaria, aunque no siempre con éxito. La implantación de dispositivos médicos que estimulan ciertos circuitos nerviosos podría ayudar a combatir la artritis reumatoide y otras enfermedades. Imagen de Bryan Christie.



redaccion@investigacionyciencia.es



Abril 2015

CÁNCER Y RESPUESTA INMUNITARIA

En «Viroterapia contra el cáncer» [Investigación y Ciencia, enero de 2015], Douglas J. Mahoney, David F. Stojdl y Gordon Laird exponen una nueva línea de investigación consistente en emplear virus modificados genéticamente para combatir el cáncer. Una de las razones por las que dicha estrategia resulta eficaz se debe a que algunos virus dañan el «camuflaje» usado por las células malignas para evitar una reacción del sistema inmunitario, lo que permite que este actúe contra el tumor.

Si tuviese la mala fortuna de contraer un cáncer incurable, ¿tendría sentido que se me injertase un tumor de otro paciente pero lo más parecido posible al mío? Mi sistema inmunitario lo rechazaría por proceder de otra persona, pero, en el proceso, tal vez aprendiese a reconocer las células cancerosas. Ello podría dar a mi sistema inmunitario una oportunidad de atacar el tumor original.

John Hobson
Devizes (Inglaterra)

Responde Mahoney: *La idea es similar a una estrategia llamada «vacunación alogénica con células cancerosas». En ella, las células malignas de una persona se irradian primero con luz ultravioleta (para matarlas) y luego se injertan en otro paciente, con el objetivo de inducir en él una respuesta inmunitaria antitumoral. Esta técnica ya ha arrojado algunos resultados alentadores en ensayos clínicos y —al igual que otras vacunas contra el cáncer— podría beneficiarse de una combinación adecuada con algunos de los fármacos inmunomoduladores aprobados recientemente por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU.*

PSEUDOCIENCIA Y DIDÁCTICA

Excelente análisis el desarrollado por Sergi Cortiñas en su artículo «La pseudociencia en los medios» [Foro científico; Investigación y Ciencia, abril de 2015]. La inexistencia de controles de calidad en los medios de comunicación permite a los pseudocientíficos participar en debates y foros de alta difusión. Eso no solo altera la percepción de los ciudadanos, sino que disuade a los verdaderos científicos de participar en ellos.

¿Qué hacer? Una gran iniciativa es catalogar y denunciar las prácticas pseudocientíficas a través de portales como http://infopseudociencia.es. Pero, además, me gustaría animar a la comunidad científica a responder con un mayor esfuerzo didáctico, así como con una verdadera exigencia a los medios de comunicación para que se respete el nivel de quienes participan en tales debates.

Lamentablemente, el mismo análisis se aplica a otro ámbito de gran influencia social: la política, cuyos debates destacan por la mediocridad de los participantes y por su falta de conocimientos sobre sociedad, historia y economía.

Fernando Correa
Tenerife

LA EXTINCIÓN DE LOS NEANDERTALES

En «La mente neandertal» [Investigación y Ciencia; mayo de 2015], Kate Wong repasa varias de las hipótesis que se han propuesto para explicar la extinción de los neandertales. Sin embargo, no hace ninguna mención a la «hipótesis inmunitaria»: la posible existencia de enfermedades a las que *Homo sapiens* fuese inmune pero los neandertales no, por la sencilla razón de no haber convivido nunca con ellas. Un fenómeno similar tuvo lugar tras el descubrimiento de América, donde las nuevas enfermedades provocaron más bajas entre la población indígena que las armas de los recién llegados.

Juan A. Pérez Esquiva
Cartagena

Responde Wong: *Es sin duda posible que la llegada del ser humano moderno a Eurasia expusiese a los neandertales a enfermedades que mermaran su población. Pero, hasta donde sé, por el momento nadie ha hallado indicios de tales enfermedades en los restos de los neandertales.*

Curiosamente, algunos análisis de ADN parecen indicar que la hibridación entre ambas especies incorporó al acervo genético del humano moderno ciertas variantes génicas neandertales responsables de una mejora en la respuesta inmunitaria. Tal vez la adquisición de dichas variantes génicas ayudase a los humanos modernos a prosperar a medida que abandonaban África y se adentraban en nuevos territorios.



Mayo 2015

Erratum corrige

En el artículo **La mente neandertal** [por Kate Wong; Investigación y Ciencia, mayo de 2015] se habla, en la página 19, de las «disimilitudes en el código genético de ambos homínidos». Como señalan nuestros lectores Max Marco y Aurelio Adán, el término *código genético* debería sustituirse por *genoma* (el código genético, las reglas que dictan la síntesis de aminoácidos a partir de una secuencia de bases dada, es prácticamente idéntico en todos los seres vivos).

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MEDIOAMBIENTE

La pluviselva, de nuevo amenazada

El aumento actual de las talas en la Amazonía podría acarrear cambios en el clima y sequías más intensas

Hasta hace poco, Brasil destacaba como un esperanzador caso aparte en la plaga de la deforestación. Entre 1990 y 2010, la tala de las selvas tropicales aumentó un 62 por ciento en el mundo, pero en Brasil esa destrucción se desplomó entre 2004 y 2011, en parte gracias a unas severas normas ambientales y a la prohibición de la venta de soja cultivada en tierras desforestadas. Sin embargo, desde agosto de 2014 la tala de árboles se ha más que duplicado allí en comparación con el mismo período del año anterior, según un análisis por satélite publicado esta primavera por el instituto de investigación independiente Imazon.

Ese informe quizás esté señalando una nueva ronda de dificultades para la selva pluvial más extensa del mundo. La mayor parte de los terrenos despejados en este auge de la tala se destinarán a pastos para el ganado, que se han visto favorecidos por el precio creciente de la carne en el mundo (la corta de árboles para crear ranchos es el principal motivo de deforestación en la Amazonía brasileña; contribuye al 70 por ciento de la tierra despejada). Y la recién reelegida presidenta de Brasil, Dilma Rouseff, ha pedido que se construyan varias presas hidroeléctricas y una carretera importante, que, si llegan a hacerse, hendirán el intacto corazón del Amazonas. El Gobierno apoya también un cambio legal que debilita la protección ambiental y ofrece la amnistía a quienes hayan cortado árboles ilegalmente; lo justifican por la necesidad de crecer económicamente.





Un estudio realizado en 2014 por el Instituto Nacional para la Investigación Espacial de Brasil halló que la deforestación, sobre todo las amplias talas a lo largo del borde meridional de la Amazonía, ha hecho disminuir el movimiento de la humedad atmosférica hacia el sur. Los climatólogos del instituto sostienen que ese cambio tal vez sea uno de los factores que esté interviniendo en la intensa sequía que ha obligado a racionar el agua en la mayor metrópolis del país, São Paulo. Y según Phillip Fearnside, biólogo del Instituto de Investigaciones de la Amazonía, si se sigue desforestando el Amazonas, al final se tendrá una sequía permanente, no solo una de esas que duran un año.

La pérdida de árboles influye más allá de las fronteras de Brasil. Conlleva una remodelación del clima en todo el hemisferio occidental: la pluviselva inyecta en la atmósfera 20.000 millones de toneladas de vapor de agua al día por medio de la transpiración de las hojas, un aporte que tiene efectos en cadena en los sistemas climáticos de otros continentes. En la actualidad, la deforestación de la Amazonía casi

ANTONIO SCORZA, GETTY IMAGES (*arriba*); RICARDO FUNARI, GETTY IMAGES (*centro*); RAPHAEL ALVES, GETTY IMAGES (*abajo*)

alcanza el 20 por ciento, lo que, según Thomas Lovejoy, uno de los pioneros de la investigación del Amazonas, significa acercarse a un punto de inflexión en lo que respecta a la capacidad de la región para mantener el sistema climático y las lluvias a las que contribuye. Una combinación desastrosa de talas, incendios y cambio climático, se teme Lovejoy, podría transformar vastas franjas del sur y del este del Amazonas en una sabana.

Así, un estudio de 2013 predice que, con un Amazonas totalmente deforestado, nevaría un cincuenta por ciento menos en la Sierra Nevada de California, lo que mermaría muchísimo la escorrentía de primavera, vital para la agricultura de la región. (Se desconoce si el grado actual de deforestación guarda relación con la sequía que está padeciendo la costa oeste de EE.UU.). Para evitar males mayores habrán de intervenir muchos actores sociales, pero parece que Brasil se está moviendo ahora en dirección contraria.

—Richard Schiffman

LENGUAJE

Del balbuceo de los murciélagos al habla infantil

Los mamíferos voladores brindan una oportunidad para investigar la adquisición del habla en humanos

En 1970, los servicios sociales de Los Ángeles descubrieron que una joven de 14 años había vivido en aislamiento social casi absoluto desde su nacimiento. Infeliz participante de un experimento no deliberado, la joven, apodada «Genie», despertó el interés de psicólogos y lingüistas, quienes se preguntaron si aún estaría a tiempo de adquirir el lenguaje pese a no haber estado expuesta a él.

Genie permitió a los investigadores acotar mejor el período crítico en el desarrollo del habla. Aunque se hizo rápidamente con un vocabulario, no llegó a dominar la gramática. Dado que, por fortuna, los casos como el de Genie no son frecuentes, se han llevado a cabo ensayos de aislamiento con loros, pájaros cantores y colibríes; animales que, como nosotros, aprenden de sus congéneres a usar la voz para comunicarse (no se trata de una facultad innata).

En el caso de los mamíferos, la mayoría de las especies con capacidad para el aprendizaje vocal (elefantes, ballenas, leones de mar) no resultan fáciles de estudiar. Por esa razón, los zoólogos de la Universidad de Tel Aviv Yosef Prat, Mor Taub y Yossi Yovel recurrieron hace poco al murciélago egipcio de la fruta: una especie que también usa la voz para interaccionar con sus semejantes y que, al igual que los niños, balbucea antes de dominar la comunicación. Los resultados del estudio, el primero en criar murciélagos en un entorno sin estímulos vocales, fueron publicados el pasado mes de marzo en *Science Advances*.



JOEL SARTORE, NATIONAL GEOGRAPHIC

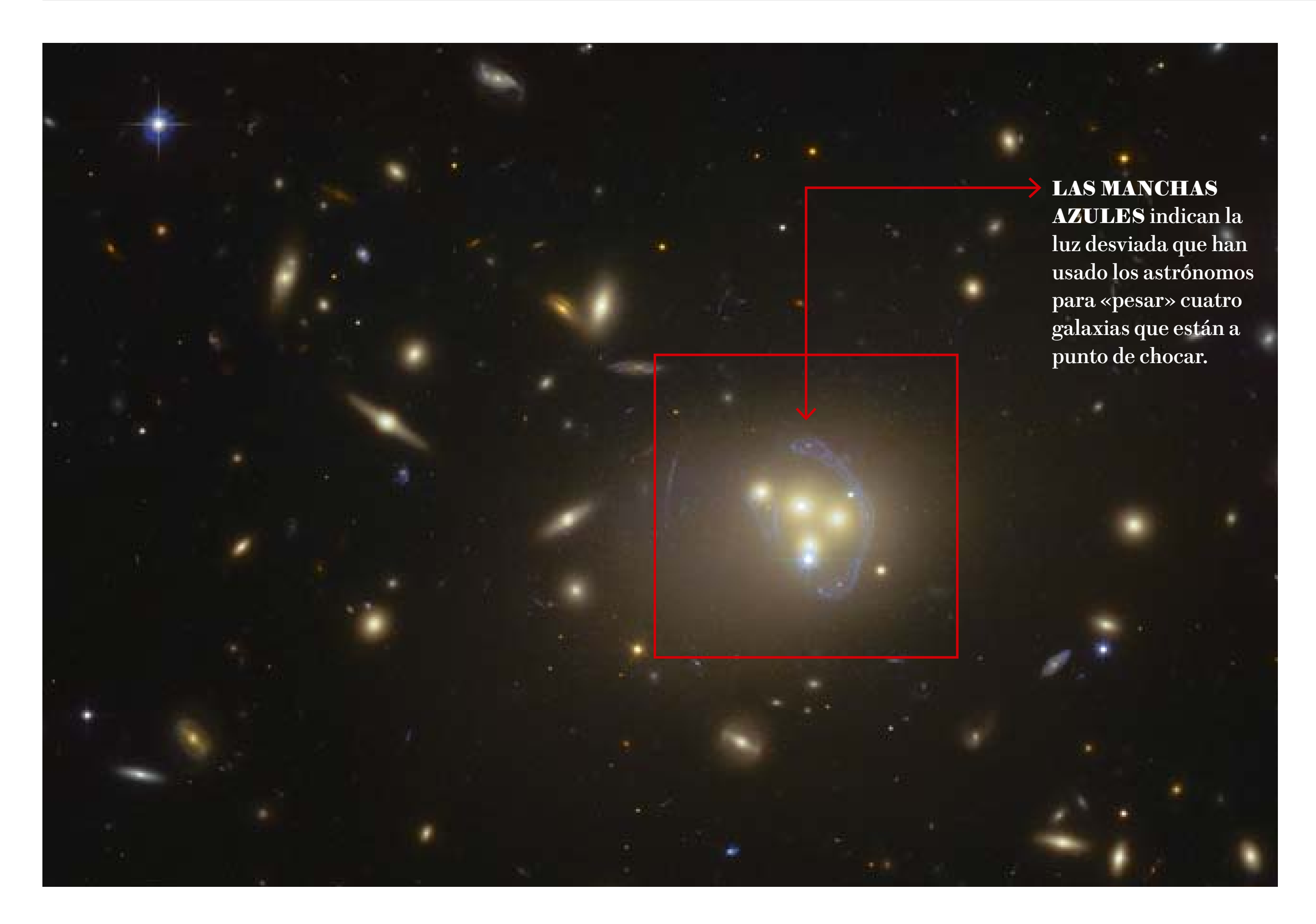
En el experimento, cinco pequeños murciélagos fueron criados exclusivamente por sus respectivas madres, por lo que no tuvieron oportunidad de oír comunicaciones entre adultos. Tras el destete, los investigadores los agruparon y los expusieron al parloteo de ejemplares adultos a través de un altavoz. Un segundo grupo de cinco crías medró en una colonia, junto con otros ejemplares adultos. Mientras que los murciélagos criados en grupo acabaron pasando del balbuceo a una comunicación normal, los que lo hicieron aislados se aferraron a sus vocalizaciones inmaduras hasta bien entrada la adolescencia. Se las apañaban para emitir sonidos adultos, pero no diferenciaban entre las vocalizaciones infantiles y las maduras.

Al juntar ambos grupos, los murciélagos que habían crecido aislados alcanzaron al resto. Yovel señala que la comunicación entre estos mamíferos se asemeja más a la humana que el canto de las aves: «Las vocalizaciones del murciélago de la fruta se emiten en un contexto conversacional», explica el investigador. «No cantan para anunciar su estatus, como los pájaros, sino que emplean la voz de un modo mucho más parecido a como los humanos usamos el habla.»

Erich Jarvis, neurobiólogo de la Universidad Duke que estudia el aprendizaje vocal en los pájaros, coincide en que, al tratarse de mamíferos, los estudios con murciélagos cuentan con un potencial mayor para entender la adquisición del lenguaje en humanos. Con todo, señala que los murciélagos del experimento tal vez recibiesen reacciones no auditivas por parte de sus madres, lo que podría haber influido en el proceso de aprendizaje vocal.

Ahora los investigadores quieren saber qué se dicen los murciélagos, tanto en el laboratorio como en libertad. Tal vez haya algo en su vocabulario que resuene en nuestras propias habilidades lingüísticas.

—Jason G. Goldman



FÍSICA

¿Interacciones de materia oscura?

Tras años de resultados negativos, un estudio aporta una insólita pista sobre el comportamiento de la misteriosa sustancia

Hay algo en el cosmos que no podemos ver ni tocar; solo sabemos que existe por el efecto gravitatorio que ejerce sobre las grandes estructuras cósmicas. Desde hace años, los únicos resultados sobre la naturaleza de la materia oscura se han limitado a revelar lo que *no* es; una criba de posibilidades que ha puesto a los físicos cada vez más nerviosos. ¿Qué ocurrirá cuando tachen el último candidato de la lista? ¿Tendrán que resignarse a no saber nunca qué compone el 85 por ciento de toda la masa del universo?

Ese triste discurrir dio un giro esperanzador hace unos meses. Un grupo de astrónomos ha obtenido resultados que apuntan a una intrigante posibilidad: la existencia de una nueva interacción entre partículas de materia oscura. De confirmarse, el hallazgo podría ayudar a desentrañar la naturaleza de la enigmática sustancia.

La pista apareció en las observaciones del cúmulo de galaxias Abell 3827. Gracias al efecto de lente gravitacional (la desviación que sufren los rayos de luz cuando pasan cerca de un objeto de gran masa), los investigadores consiguieron inferir la distribución de materia oscura entre cuatro galaxias en proceso de colisión. Las observaciones del telescopio espacial Hubble y del VLT, en Chile, indicaron que la materia oscura de al menos una de ellas se encontraba considerablemente rezagada con respecto a la materia visible. El fenómeno apuntaría a la existencia de una interacción entre partículas de materia oscura, la cual generaría una especie de «rozamiento interno» que las frenaría. Es la primera vez que se observa algo semejante.

El grupo de investigadores, dirigido por Richard Massey, de la Universidad de Durham, conjetura que, dado que la materia ordinaria no parece haberse visto afectada, el fenómeno se debería a una interacción no gravitatoria que solo actuaría sobre las partículas de materia oscura; por ejemplo, un intercambio de «fotones oscuros» (por analogía con el electromagnetismo, en el que la atracción o repulsión entre dos cargas se explica mediante el intercambio de partículas de luz).

El hallazgo ha incitado a los físicos a buscar respuestas. «Si las observaciones se consolidan, nos encontraríamos ante un resultado más que importante», opina Neal Weiner, físico la Universidad de Nueva York que no participó en la investigación. Un escenario con fotones oscuros supondría alejarse de una de las hipótesis más populares para explicar la materia oscura, la cual postula que esta se compone de un solo tipo de partícula, bautizada a menudo con el nombre genérico de WIMP, por las siglas en inglés de «partícula masiva que interacciona débilmente». Además, la existencia de fotones oscuros e interacciones exóticas podría ayudar a entender varias incógnitas que deja abiertas la hipótesis de una única WIMP, como por qué los centros galácticos son menos densos de lo esperado.

En caso de confirmarse, la nueva interacción permitiría acotar de manera considerable la larga lista de candidatos que se han propuesto para explicar la materia oscura. «Aunque contamos con todo tipo de indicios que confirman su existencia,



EL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE ha identificado un comportamiento extraño en la materia oscura de galaxias en colisión.

todo lo que sabemos sobre la materia oscura se limita a sus interacciones gravitatorias», apunta Weiner. Si se demuestra que las partículas que la componen interaccionan entre sí con la intensidad que sugiere el nuevo estudio, tendrán que descartarse numerosos modelos, asegura el investigador.

En particular, el hallazgo, que apareció publicado en abril en la edición en línea de *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, pondría en aprietos a un gran número de modelos que postulan que la partícula de materia oscura sería una de las predichas por las teorías supersimétricas. La supersimetría —una atractiva idea que pretende resolver varios de los problemas conceptuales del modelo estándar, como por qué la masa del bosón de Higgs es tan pequeña— implica la existencia de un gran número de partículas elementales que no habrían sido observadas hasta ahora. Sin embargo, si la materia oscura se compusiese de una de ellas (que bien podría ser una WIMP), la mayor parte de las encarnaciones de la teoría predicen que dicha partícula no interaccionaría consigo misma.

Los autores del estudio reconocen que aún es pronto para descartar otras explicaciones más prosaicas. Por ejemplo, podría ocurrir que la materia oscura situada fuera de las galaxias pero en la línea de visión desde la Tierra haya contribuido al efecto de lente gravitacional. «Una salvedad que hay que hacer a este estudio es que se trata de un solo objeto», admite David Harvey, del Instituto Federal Suizo de Tecnología en Lausana y miembro del equipo. «Hay cosas que ignoramos y que ni siquiera sabemos que ignoramos, lo que podría modificar el resultado.»

De hecho, las investigaciones de otros cúmulos de galaxias no han detectado indicios de interacciones no gravitatorias entre partículas de materia oscura. Así ocurrió con un estudio publicado en marzo en la revista *Science* y dirigido por el propio Harvey, que analizó 72 colisiones entre cúmulos de galaxias. Sin embargo, ambos estudios no son contradictorios: dado que los cúmulos tienden a chocar más rápido que las galaxias, la materia oscura de los primeros dispone de menos tiempo para interaccionar consigo misma y rezagarse.

Si al final las nuevas observaciones se quedan en nada, Abell 3827 se convertirá en un ejemplo más de lo que la materia oscura no es. Mientras, los experimentos subterráneos que intentan detectar las misteriosas partículas a su paso por la Tierra siguen sin ver nada. Y aunque, con suerte, el LHC podría alcanzar la energía necesaria para crearlas, por el momento tampoco han aparecido allí. Con todo, los expertos no pierden la esperanza. Tras dos años de parada técnica, el acelerador se puso de nuevo en marcha en abril. Sus detectores son ahora sumamente sensibles y la energía de las colisiones batirá en breve todos los récords. «La materia oscura se nos ha escapado muchas veces, pero nunca antes habíamos tenido tantos datos como los que tendremos ahora», apunta Harvey. «Me da la impresión de que es o ahora o nunca.»

—Clara Moskowitz

CORTESÍA DE ESA/TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (*Hubble*); ANDREW CHAPPEL (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de junio
La luz y la astronomía
Eduardo Battaner López, Universidad de Granada
Centro del Profesorado
Ronda
www.serraniaderonda.com

15 de junio
Cambio climático y producción mundial de alimentos: Retos para la investigación en plantas
José Manuel Moreno, vicepresidente del IPCC
José Pío Beltrán, presidente de la Organización Europea de Ciencias Vegetales
Toledo
www.fv2015.org > Programa

18 de junio
El largo y sinuoso camino de la relatividad general
Alberto Galindo Tixaire, Universidad Complutense de Madrid
Ciclo «Ciencia para todos»
Real Academia de Ciencias
Madrid
www.rac.es

EXPOSICIONES

Pull push. Un mundo empujado por la luz
Espacio Cultura, Sabadell
www.espaiculturasabadell.cat > Actividades



OTROS

3 de junio – Jornada
Divulgación sobre oncología radioterápica
Valencia
www.congresoseor.com > Programa

6 de junio
World Wide Views – Debate ciudadano sobre clima y energía
Caixaforum, Madrid
www.climayenergia.es

Del 12 al 14 de junio
Congreso sobre la colaboración entre profesionales y *amateurs* en investigación astronómica
Alcalá la Real, Jaén
http://astroalcala.wix.com/2proam

MATEMÁTICAS

Vórtices anudados en fluidos ideales

Un trabajo demuestra matemáticamente la existencia de estructuras estables con forma de nudo en líquidos y gases. El fenómeno se remonta a una conjetura sobre las ecuaciones de Euler planteada en 1875 por Lord Kelvin para explicar la estructura atómica de la materia

ALBERTO ENCISO Y DANIEL PERALTA-SALAS

En 1757, el gran matemático suizo Leonhard Euler publicó las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos ideales: un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales que, obtenidas a partir de las leyes de Newton, dan cuenta de la dinámica de los líquidos y gases incompresibles y no viscosos. A pesar de sus innumerables aplicaciones en la ciencia y la industria, las ecuaciones de Euler revisten tal riqueza y complejidad que, más de 250 años después, el estudio de sus soluciones sigue planteando todo tipo de retos a la comunidad científica.

Fue justamente el análisis de dichas ecuaciones lo que en 1875 llevó a William Thomson, más tarde conocido como Lord Kelvin, a enunciar una famosa conjetura. Unos años antes, el físico británico había planteado la posibilidad de que los átomos fuesen «nudos» de éter, un fluido no viscoso (y, por tanto, descrito por las ecuaciones de Euler) que en aquella época se pensaba que impregnaba todo el universo. Pero, para que aquella propuesta tuviese sentido, las ecuaciones de Euler debían admitir soluciones estables que describiesen dichas geometrías anudadas.

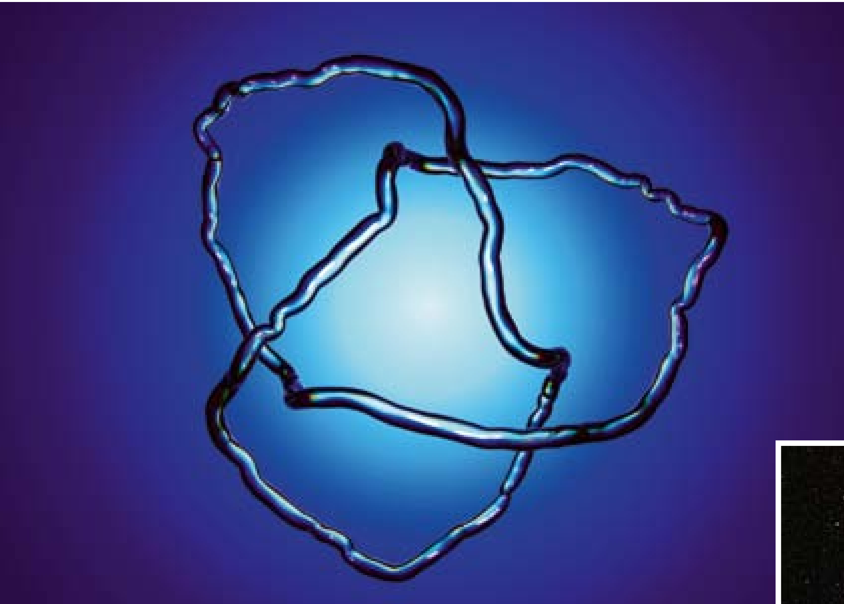
Aunque la existencia del éter fue descartada algunos años después, la cuestión de si las ecuaciones de Euler admiten o no soluciones como las propuestas por Kelvin permanecería abierta durante casi 150 años. Hace poco, los autores de este artículo conseguimos demostrar la conjetura de Kelvin. Aparte de resolver un problema centenario, las herramientas desarrolladas en el proceso conectan distintas áreas de las matemáticas y prometen interesantes aplicaciones en otros campos.

Lazos de agua

A mediados del siglo xix, Hermann von Helmholtz halló un interesante resultado sobre las ecuaciones de Euler. Demostró que sus soluciones incluían ciertas estructuras, a las que denominó «tubos de vorticidad», o «vórtices», las cuales se deformaban de manera muy simple con el movimiento del fluido. En términos sencillos, podemos imaginar un vórtice como una región en la que el fluido rota alrededor de cierto eje, como ocurre en un tornado.

Helmholtz demostró que, en el seno de un fluido ideal, los vórtices debían quedar unidos por sus extremos. James Clerk Maxwell, el padre de la teoría electromagnética, llamó a dichas estructuras «lazos de agua». Aquel resultado teórico fue ilustrado experimentalmente por el físico Peter Tait, quien construyó un cañón que escupía vórtices de humo con forma de anillo.

Fascinado por los descubrimientos de Helmholtz y Tait, Maxwell sugirió la posibilidad de que los vórtices presentasen geometrías más elaboradas que la de un simple anillo. Si tomamos un tubo y unimos sus extremos, la estructura resultante no tiene por qué adoptar forma de rosquilla, ya que siempre podremos anudarlo para crear lazos más complejos. Maxwell se preguntó si, en un fluido, los vórtices podrían adoptar tales geometrías anudadas. Esa inocente sugerencia marcó el punto de partida de una teoría que, con





UN TEOREMA EN EL LABORATORIO: **Tras casi un siglo y medio de intentos, la riqueza topológica de las ecuaciones de Euler ha sido demostrada matemáticamente y verificada en el laboratorio. La imagen superior, obtenida a partir de los datos de una cámara ultrarrápida, muestra un vórtice de agua con forma de trébol creado por William Irvine y Dustin Kleckner en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Chicago. A la derecha, una fotografía del dispositivo experimental.**

IMÁGENES CORTESÍA DE WILLIAM IRVINE/UNIVERSIDAD DE CHICAGO: D. KLECKNER Y W. IRVINE (*vórtice*); ROBERT KOZLOFF (*montaje experimental*)

el paso de los años, inspiraría a generaciones de físicos y matemáticos.

Las ideas de Helmholtz y Maxwell culminaron en 1867 con la teoría atómica de Kelvin. Esta postulaba que los átomos eran vórtices anudados y estables en el éter. En concreto, cada manera de anudar el vórtice se correspondería con un elemento de la tabla periódica: hidrógeno, helio, oxígeno, hierro, etcétera.

Pero los vórtices de Helmholtz adolecían de un inconveniente: a medida que el fluido evolucionaba, podían deformarse y llegar a romperse, por lo que carecían de la estabilidad que necesitaba la teoría atómica de Kelvin. Tras una serie de trabajos sobre la cuestión, en 1875 Kelvin conjeturó que las soluciones de las ecuaciones de Euler debían incluir vórtices anudados estacionarios (es decir, en equilibrio). Sin embargo, y a pesar de sus numerosos intentos, Kelvin nunca llegó a demostrar dicha conjetura.

Aunque la elegancia de la teoría de Kelvin cautivó a la comunidad científica durante dos décadas, a finales del siglo XIX quedó claro que se basaba en una concepción errónea de la materia. Ni el éter existía, como en 1887 demostró el experimento de Michelson y Morley, ni los átomos eran anillos anudados, como ilustró el descubrimiento del electrón en 1897.

Con todo, los vórtices de Helmholtz siguieron suscitando un gran interés debido a su relación con todo tipo de cuestiones ligadas al estudio de los fluidos. Por ejemplo, la evolución de los vórtices en un fluido se ha convertido en una herramienta fundamental para analizar la aparición de eventos explosivos, así como la turbulencia (básica, a su vez, para entender la aerodinámica). Además, el estudio de los distintos tipos de vórtices dio lugar al nacimiento de una nueva rama de las matemáticas: la teoría de nudos, la cual partió de la clasificación publicada por Tait (al estilo de la tabla periódica de los elementos) y que, con el tiempo, ha encontrado aplicaciones en problemas tan dispares como la caracterización de la estructura del ADN, el estudio del plegamiento de proteínas o la computación cuántica.

De conjetura a teorema

El primer avance profundo sobre las estructuras que pueden aparecer en las soluciones estacionarias de las ecuaciones de Euler llegó en 1965. Aquel año, el matemático ucraniano Vladímir Arnold, por entonces en la Universidad de Moscú, publicó un trabajo en el que apuntaba que las estructuras como las conjeturadas por Kelvin debían aparecer en un tipo de soluciones conocidas como «campos de Beltrami». Estos describen fluidos en equilibrio que satisfacen una propiedad muy especial: que la vorticidad (el vector que caracteriza el grado de enrollamiento del fluido sobre sí mismo) se encuentra alineada en cada punto con la velocidad del fluido.

En las décadas siguientes, varios trabajos experimentales corroboraron que las regiones más turbulentas de un fluido de baja viscosidad eran aquellas que cumplían la propiedad de Beltrami. Por otro lado, diversos estudios numéricos identificaron en estos campos algunos casos particulares de los vórtices conjeturados por Kelvin.

De manera casi simultánea a los trabajos de Arnold, el físico matemático Keith Moffatt, de la Universidad de Cambridge, había introducido el concepto de «helicidad», una magnitud que permitía cuantificar el grado de anudamiento de un fluido. A partir de una analogía con ciertos fenómenos magnéticos, Moffatt ideó un argumento que sugería la existencia de vórtices anudados estacionarios. Hasta hoy, sin embargo, nadie ha logrado construir una demostración rigurosa basada en estas ideas.

En 2012, los autores de esta nota publicamos en el repositorio científico de libre acceso arXiv un trabajo que finalmente demostraba la conjetura de Kelvin. Tras dos años de verificación por parte de otros expertos, nuestro artículo fue aceptado en la revista *Acta Mathematica*. También en 2012, William Irvine y Dustin Kleckner, de la Universidad de Chicago, crearon por primera vez en el laboratorio vórtices anudados en un fluido, un resultado que publicaron en 2013 en *Nature Physics*. Con estos dos trabajos quedaba por fin demostrada la conjetura de Kelvin, tanto desde el punto de vista teórico —ahora la conjetura puede llamarse teorema— como experimental.

Del éter a los plasmas

Nuestra demostración hace uso de ideas y técnicas pertenecientes a distintas áreas de las matemáticas en las que hemos estado trabajando durante los últimos diez años. Entre ellas destacan las ecuaciones en derivadas parciales, los sistemas dinámicos y la geometría diferencial.

Desde el punto de vista de las ecuaciones en derivadas parciales, una herramienta esencial ha sido un nuevo método para generar soluciones globales a partir de soluciones locales. En el contexto de los sistemas dinámicos, un ingrediente clave fue la adaptación a la mecánica de fluidos del teorema de Kolmogórov-Arnold-Moser, usado tradicionalmente en mecánica celeste.

Cabe destacar que, tal y como anticipó Arnold, nuestras soluciones satisfacen la propiedad de Beltrami. Ello aumenta de manera automática la aplicabilidad del teorema, ya que los campos de Beltrami describen varios fenómenos que no guardan relación con la mecánica de fluidos, como las fulguraciones de plasmas en las atmósferas estelares.

Las ideas y técnicas desarrolladas para demostrar la conjetura de Kelvin pueden adaptarse para iluminar otros problemas en física matemática que, en último término, consisten en entender las propiedades geométricas de las soluciones a ciertas ecuaciones en derivadas parciales. No en vano, las mismas técnicas están resultando de gran utilidad en el estudio teórico de las líneas de fuerza magnéticas, el análisis de las superficies equipotenciales del electromagnetismo o el tratamiento de algunas propiedades de la función de onda cuántica.

Por último, la existencia de vórtices de geometría arbitrariamente compleja abre las puertas a otras aplicaciones futuras, posiblemente en el confinamiento de plasmas. Pero esa historia tendrán que escribirla otros investigadores, quizá dentro de varias décadas, pues ese es el camino de la ciencia.

—Alberto Enciso y Daniel Peralta-Salas
Instituto de Ciencias Matemáticas
Madrid

PARA SABER MÁS

Vortex statics. William Thomson en *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 9, págs. 59-73, 1875. Reimpreso en *Mathematical and physical papers IV*, Cambridge University Press, 2011.

Creation and dynamics of knotted vortices. Dustin Kleckner y William Irvine en *Nature Physics*, vol. 9, págs. 253-258, abril de 2013.

Existence of knotted vortex tubes in steady Euler flows. Alberto Enciso y Daniel Peralta-Salas en *Acta Mathematica*, vol. 214, n.º 1, págs. 61-134, marzo de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1210.6271**

EN NUESTRO ARCHIVO

Orígenes de la teoría de nudos. Daniel S. Silver en *IyC*, julio de 2006.

Principales usos de la tierra

No indicado
Combustible
Forestal
Alimento
Flexible

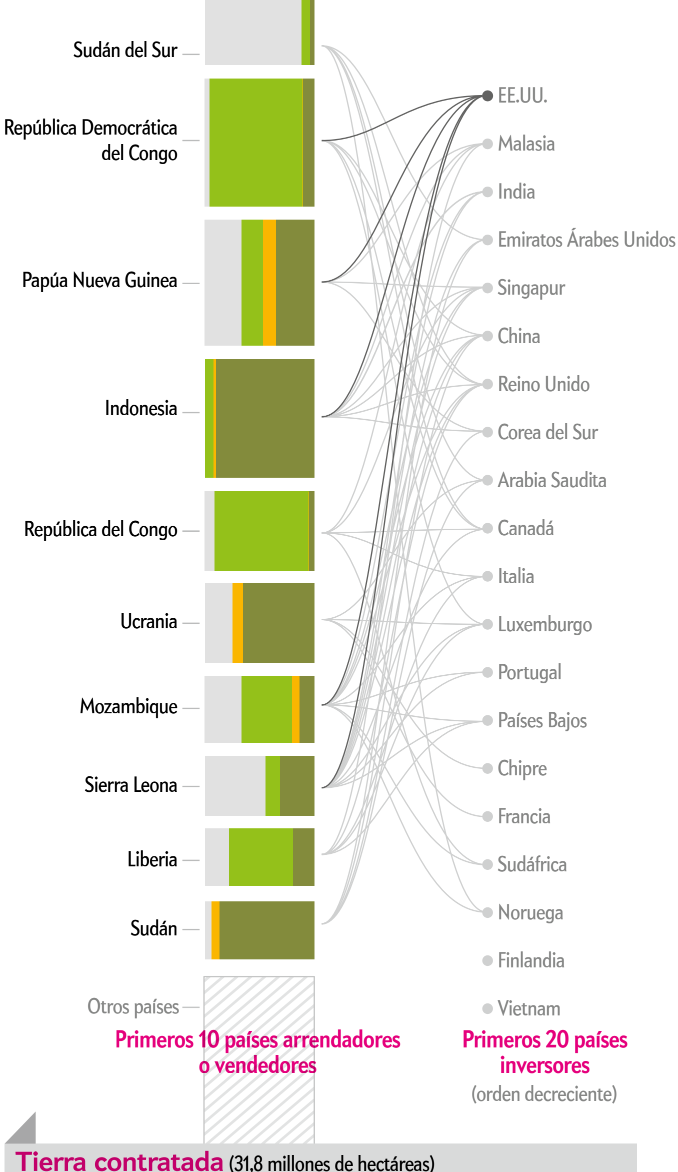
Luxemburgo
Finlandia
Singapur
Malasia
Reino Unido
Francia
EE.UU.
Canadá
Austria
Japón
Dinamarca
India
Suecia
Vietnam
Alemania
Bélgica
Chile
Tailandia
Arabia Saudita
China

Ucrania
Indonesia
Uruguay
Brasil
Laos
Papúa Nueva Guinea
China
Rumania
India
Madagascar
Otros países

Primeros 20 países inversores
(compra o arrendamiento de tierras con fines agrícolas en los 10 primeros países destinatarios u otros países)

Primeros 10 países arrendadores o vendedores
(todos los inversores)

Tierra en producción (2,7 millones de hectáreas)



Tierra contratada (31,8 millones de hectáreas)

El norte se apropia de las tierras del sur

Para satisfacer la creciente demanda de alimentos, combustible y madera, los países están acaparando propiedades fuera de sus fronteras

La tierra fértil es un recurso cada vez más escaso en el mundo, sobre todo para cultivos alimentarios, pastos, biocombustibles, madera y fibras como el algodón. Para generar estos productos, los países prósperos como EE.UU. y los países pequeños con escasa superficie están comprando o arrendando en otras naciones enormes extensiones de tierra aptas para la agricultura. Los productos se envían a casa o se venden en los mercados locales, a veces a costa de los agricultores, terratenientes y negocios autóctonos. En los últimos 15 años, las empresas y los grupos gubernamentales de los países «inversores» han acaparado 31,8 millones de hectáreas de suelo, una superficie mayor que la de Polonia (*columna derecha*), según la base de datos *Land Matrix Global Observatory*, que recoge las transacciones de tierras realizadas en países de rentas medias y bajas. Hasta la fecha, solo 2,7 millones de esas hectáreas han sido destinadas a la explotación de cultivos (*columna izquierda*). En estos momentos se está produciendo una gran transferencia de la propiedad de tierras del hemisferio sur hacia el norte. —*Mark Fischetti*

EE.UU., India y Malasia están acaparando las superficies más extensas de tierra (*lista del extremo derecho*). Los países con Gobiernos débiles, como Sudán del Sur y Papúa Nueva Guinea, son con frecuencia los objetivos principales (*columna derecha*), según Kimberly Nicholas y Emma Li Johansson, de la Universidad de Lund, que han analizado los datos.

Los datos abarcan la tierra adquirida entre 2000 y 2014. No incluyen los acuerdos multilaterales porque no siempre puede concretarse la cuota de cada participante; estos acuerdos elevan la superficie total de tierras bajo contrato hasta los 51,1 millones de hectáreas.

FUENTE: LAND MATRIX GLOBAL OBSERVATORY; ÚLTIMO ACCESO: 4 DE FEBRERO DE 2015 www.landmatrix.org; EMMA LI JOHANSSON, Universidad de Lund (*clasificación y procesamiento complementario de los datos*); NIGEL HAWTIN (*gráfico*)

TECNOLOGÍA

Nuevas aplicaciones de la sonificación

La transformación de datos en señales audibles se está usando para detectar células cancerosas y partículas provenientes del espacio

RON COWEN

Hace tres años, el compositor Robert L. Alexander estaba sentado frente a su ordenador portátil escuchando un archivo de sonido que habría hecho dormir a la mayoría de la gente: se trataba de un tenue aleteo, similar al de una bandera lejana que ondease impulsada por una brisa constante. Este se repetía una y otra vez con oscilaciones en su volumen. A los cuarenta y cinco minutos, el aleteo cesó y fue sustituido por un sonido similar al del viento que sopla a través de un bosque. Según recuerda Alexander, era «el más impresionante de todos los silbidos».

De hecho, el sonido era una representación de algo semejante al viento: el viento solar, una virulenta ráfaga de partículas cargadas que el Sol arroja a razón de un millón de toneladas por segundo. En 2008, la sonda Wind de la NASA había medido el campo magnético creado por estas partículas mientras se acercaban a la Tierra. Este campo es completamente silencioso, pero su intensidad y dirección fluctúan. Alexander, estudiante de posgrado en la Universidad de Michigan, donde trabaja con datos solares, había aplicado su propio algoritmo para convertir esas variaciones en sonidos audibles.

Pero no lo hizo solo por su afición musical. A sus 30 años, Alexander forma parte de un creciente conjunto de investigadores dedicados a la ciencia de la sonificación: la conversión en sonido de datos que normalmente se representarían de forma visual o numérica. El oído, más que la vista, tiene una capacidad excepcional para captar diferencias sutiles en un patrón; ello es muy útil para el estudio de fenómenos que no son obvios en una presentación visual, como ciertas actividades astronómicas o determinadas diferencias entre células cancerosas y normales.

Andrew King, neurobiólogo de la Universidad de Oxford, afirma que nuestros oídos pueden detectar cambios en un sonido que sucedan a intervalos de pocos milisegundos. En comparación, el límite del ojo para detectar una luz intermitente es de entre 50 y 60 veces por segundo. Además de en el estudio de la actividad solar y del cáncer, la sonificación se ha empleado en el análisis de erupciones volcánicas y para discriminar patrones de cambios en partículas relacionados con la radiación cósmica del fondo de microondas, el remanente de la gran explosión (*big bang*). Muchos investigadores aún no son conscientes del potencial del método.

Sensibilidad acústica

La conversión de datos en sonido no es una idea nueva. El contador Geiger, inventado en 1908, emite chasquidos cuando detecta partículas energéticas dotadas de carga eléctrica. En los años ochenta, el físico Donald A. Gurnett, de la Universidad de Iowa, fascinó al público con grabaciones de una tormenta de granizo en las cercanías de Saturno. Convirtió ciertos datos de las sondas Voyager 1 y 2 en tintineos producidos por trozos de material helado que chocaban con estas mientras se abrían paso a través de los anillos del planeta.

El oído puede captar patrones sutiles, sugiere el neurobiólogo Bechara Saab, del Centro de Neurociencia Zúrich, porque el sistema auditivo de los mamíferos es más rápido en la transmisión de señales neuronales que la mayoría de otras partes del cerebro. Allí reside el cáliz de Held, la conexión entre neuronas (sinapsis) más grande que se conoce. Esta unión en forma de flor transforma las ondas de sonido en picos de actividad neuronal, para lo cual libera neurotransmisores a una frecuencia de 800 veces por segundo. Por el contrario, el camino de la visión no posee una conexión neuronal tan rápida. Por tanto, estímulos que serían «invisibles» para el ojo los capta el oído fácilmente.

Para crear señales audibles a partir de datos numéricos, los científicos toman las fluctuaciones en rayos X y gamma (o cualquier otra señal invisible para el ojo) y asignan un sonido diferente para cada frecuencia o cambio en intensidad, adaptándolos al intervalo de audición humana. La clave reside en comprender el significado que hay detrás de cualquier cambio percibido.

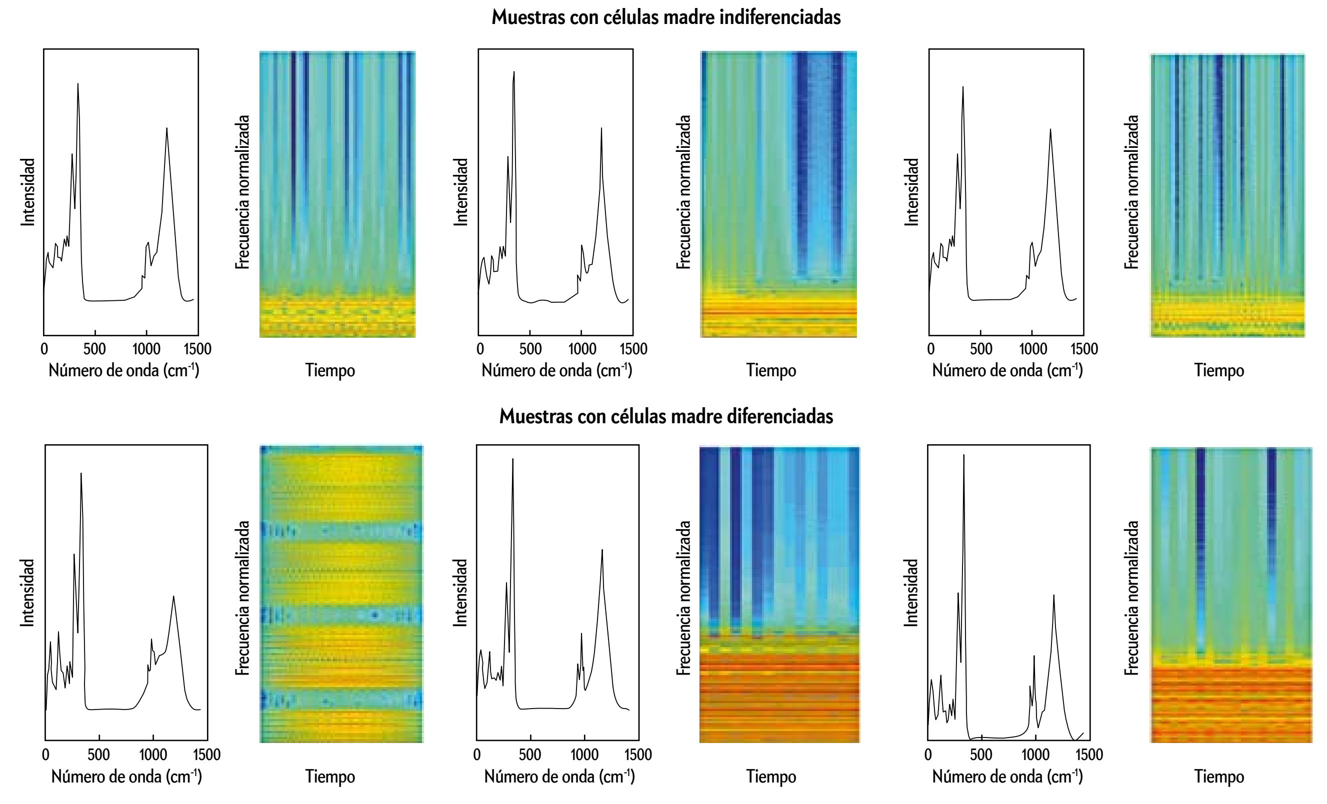
Cuando aquel día de 2012 Alexander oyó el «silbido», realmente no tenía ni idea de lo que podría significar. Tampoco lo sabía el físico espacial Robert T. Wicks, investigador en el Centro Goddard, quien había proporcionado los datos en bruto a Alexander. Pero cuando Wicks comenzó a escudriñar en las medidas registradas por otros instrumentos de la sonda Wind durante el mismo período de tiempo, observó una extraña correlación con la grabación de Alexander. Casi cada vez que esta emitía un sonido «silbante», Wick detectaba un aumento en la densidad de determinadas partículas cargadas (iones de helio) en el viento solar.

Una posibilidad es que el flujo de iones, que giran alrededor de las líneas del campo magnético, retorne parte de su energía al mismo, haciendo que este oscile. Esa interacción revela un modo en que la energía va y viene entre el campo y las partículas. Ello, a su vez, puede ofrecer nuevas pistas sobre uno de los misterios más profundos del Sol: por qué su atmósfera exterior tiene una temperatura cientos de veces superior a la de su superficie en constante agitación.

El potencial de ese archivo sonoro se debe, en parte, a la capacidad del sonido para comprimir la información. La sonda Wind mide el campo magnético transportado por el viento solar con una frecuencia aproximada de 11 veces por segundo. Pero la velocidad de muestreo para un CD de audio agrupa 44.100 medidas en un segundo de sonido en el rango de audición humana. Así, un año de medidas sobre el terreno se convierte en solo dos horas de sonido, mientras que su análisis visual tomaría meses.

Oir el viento solar

Esas variaciones sonoras han llamado la atención de los científicos sobre importantes diferencias en el viento solar. Hace dos años, Alexander creó un archivo de audio con medidas de la corriente de partículas magnéticas solares registradas por otro satélite de la NASA, el Explorador de Composición Avanzada (ACE, por sus siglas en inglés). Convirtió en sonidos audibles señales que mostraban la abundancia relativa de dos tipos de iones de carbono en el viento solar: los



FUENTE: «ASSISTED DIFFERENTIATED STEM CELL CLASSIFICATION IN INFRARED SPECTROSCOPY USING AUDITORY FEEDBACK», POR DOMENICO VICINANZA ET AL. EN *THE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUDITORY DISPLAY*; 22-25 DE JUNIO DE 2014

PARA IDENTIFICAR LA NATURALEZA DE UN TEJIDO BIOLÓGICO a menudo se emplea la espectroscopía: se ilumina con una luz determinada la muestra y esta genera un patrón de absorción característico según el tipo de células que contiene. Sin embargo, dado que las diferencias visuales entre estos espectros son sutiles, su análisis requiere mucha experiencia y tiempo. Por este motivo, se está valorando la posibilidad de agilizar el proceso mediante la sonificación, es decir, la transformación de los espectros en señales de audio, que son más fáciles de clasificar. Se ilustran aquí los espectros de absorción (*en blanco y negro*) y sus correspondientes sonogramas (*en color*) para seis muestras biológicas, tres con células madre indiferenciadas (*arriba*) y las otras tres con células madre diferenciadas (*abajo*). Mientras que los seis espectros ofrecen una imagen bastante similar, los sonogramas presentan patrones muy fáciles de distinguir cuando se escuchan: las células diferenciadas generan un sonido más distorsionado y un timbre más áspero que las indiferenciadas.

que carecen de cuatro de sus seis electrones y otros que los han perdido todos. Mientras escuchaba el archivo, distinguió un murmullo a una frecuencia de 137,5 ciclos por segundo, un sonido cercano a un do sostenido por debajo del do central. La existencia de ese murmullo significaba que las cantidades relativas de los dos tipos de iones de carbono fluctuaban a lo largo del tiempo. Los sonidos asignados a los diferentes iones interferían entre sí de vez en cuando.

La frecuencia del murmullo albergaba una pista valiosa: correspondía a un intervalo de tiempo de casi 27 días en los datos originales de la sonda espacial, que es el tiempo que tarda el Sol en completar una rotación sobre su eje. Alexander comunicó su descubrimiento a Enrico Landi, físico espacial de la Universidad de Michigan, quien se dio cuenta de que la proporción entre ambos tipos de iones de carbono cambiaba en sincronía con los dos tipos de viento producidos por el Sol. Uno de ellos, el más rápido, procede de los agujeros coronales, las regiones más frías y oscuras de la atmósfera solar exterior (corona). La densidad de las líneas del campo magnético en estas regiones no es muy alta, por eso dejan escapar las partículas con mayor rapidez. Por el contrario, el viento lento procede de las regiones más calientes, que tienen campos magnéticos más densos. Como poseen mayor energía, esas regiones con temperaturas superiores despojan de todos sus electrones a más átomos de carbono de lo que lo hacen las regiones más frías.

En 2012, Landi, Alexander y sus colaboradores publicaron un trabajo en *Astrophysical Journal* donde argumentaban que el análisis de las diferencias de iones de carbono era la mejor forma para distinguir entre ambas clases de viento solar. Afirmaban que este método debería sustituir al estudio de la proporción de iones de oxígeno, la herramienta estándar de diagnóstico. Una advertencia temprana sobre el tipo de viento solar que se dirige hacia la Tierra puede ser importante, porque cada uno de ellos produce un tipo diferente de meteorología espacial y sus propiedades magnéticas pueden perturbar las comunicaciones por satélite de distintas formas.

Diferencias en las células

Con la conversión de datos en sonido se pueden obtener incluso beneficios más prácticos. Se ha comenzado a aplicar la sonificación al problema de distinguir entre células cancerosas y sanas.

Ryan Stables, músico y tecnólogo de medios digitales en la Universidad de la Ciudad de Birmingham, señala que «en el sistema sanitario del Reino Unido, hay que esperar mucho tiempo entre la obtención de una biopsia de un paciente, su envío al laboratorio, su análisis y su posterior devolución». Al consultar con un colega, el químico analítico Graeme Clemens, de la Universidad de Lancashire Central,

Stables tuvo la idea de transformar una técnica visual de identificación de células cancerosas en un método sonoro que permitiera acelerar el proceso.

En el procedimiento habitual, basado en la espectroscopía Raman, se hace incidir luz de un láser infrarrojo sobre las células en un portaobjetos. La energía de la luz provoca la vibración de las moléculas en las células; pero diferentes tipos de moléculas vibran de maneras distintas, por lo que generan patrones característicos (huellas) en el espectro de luz dispersada. Algunas, como ciertas proteínas anormales en cánceres, generan huellas distintas con respecto a las proteínas normales. Sin embargo, las diferencias visuales son sutiles y determinar si las células están sanas o no requiere tiempo y experiencia.

La sutileza es desde luego un punto fuerte de la audición. «El oído humano está entrenado para la observación de patrones y regularidades, y es mucho más eficiente que el ojo reconociéndolos», afirma el colaborador de Stables, Domenico Vicinanza, físico y músico que trabaja en DANTE, un consorcio europeo con sede en Cambridge que desarrolla y trabaja con redes de alta velocidad para investigación y educación. Por ejemplo, el ojo no puede distinguir entre dos luces que parpadean 30 y 60 veces por segundo respectivamente, mientras que el oído diferencia dos fuentes de sonido que emitan con estas mismas frecuencias.

En colaboración con Vicinanza, Stables sonificó los datos espectroscópicos, convirtiendo en sonidos distintivos aquellas partes del espectro que muestran diferencias entre células cancerosas y sanas. Stables se sorprendió de lo bien que podían clasificarse.

Llevaron a cabo un ensayo con unos 150 médicos, que recibieron 300 archivos de sonido correspondientes a muestras de tejido. Según Stables, los probandos distinguieron correctamente las diferencias entre las muestras con un éxito cercano al 90 por ciento. Junto con sus colegas, dio a conocer este trabajo en junio del año pasado en la 20.ª Conferencia Internacional sobre Presentación Auditiva celebrada en Nueva York. El equipo espera comenzar las pruebas de sus espectros sonificados en los consultorios médicos dentro de un año.

Stables también cree que ese método podría introducirse en los quirófanos. Proporcionaría a los cirujanos información rápida sobre si se han extirpado todas las células cancerosas o no. Para ello el análisis espectroscópico debería realizarse con prontitud, sonificar los datos y transmitirlos al quirófano. Además, dadas las particularidades del escenario, las notas, tonos y timbres elegidos no solo deberían conservar el carácter del espectro original, sino también crear sonidos agradables —un zumbido constante y molesto podría resultar perjudicial para una actividad que requiere concentración y precisión.

Un sentido poco educado

Aunque la sonificación ofrece ventajas con respecto a la presentación visual, Stables, Alexander y otros expertos en acústica se enfrentan a un obstáculo importante: hallar investigadores que prueben esta nueva forma de analizar datos. Como bien apunta Alexander, desde la escuela primaria vivimos rodeados de representaciones visuales, gráficos de barras y diagramas de tarta; cuando alguien se convierte en científico ya posee una sintaxis, una comprensión sobre el modo de funcionamiento de esos gráficos y un tipo de lógica interna. En cambio, cuando accionamos la tecla «*play*» y escuchamos por primera vez los datos sonificados, carecemos de un vocabulario específico para este tipo de información; no poseemos realmente una base para la comparación.

Con todo, la reciente popularización de esta técnica, alimentada sobre todo por sus aplicaciones musicales (el registro en rayos X del comportamiento violento de la estrella binaria EX Hydrae se ha convertido en un álbum musical de ritmos afrocubanos) podría ayudar a resaltar el valor del enfoque auditivo.

—Ron Cowen
Periodista científico especializado en física y astronomía.

PARA SABER MÁS

Assisted differentiated stem cell classification in infrared spectroscopy using auditory feedback. Domenico Vicinanza et al. Presentado en la Conferencia Internacional sobre Presentación Auditiva de 2014, 23 de junio de 2014.

The bird's ear view of space physics: Audification as a tool for the spectral analysis of time series data. Robert L. Alexander et al. en *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 119, n.º 7, págs. 5259-5271, julio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Integración sensorial. Christoph Kayser en *MyC* n.º 25, 2007.



ELECTRÓNICA MÉDICA

MEDICINA BIOELECT

La estimulación del sistema nervioso podría reemplazar a los fármacos en el tratamiento de enfermedades inflamatorias y autoinmunitarias

Kevin J. Tracey

EN SÍNTESIS

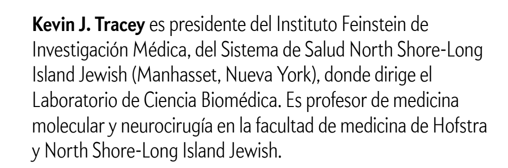
La exposición al calor, la presión, la luz o ciertos compuestos químicos desencadenan reflejos que nos ayudan a evitar lesiones en el cuerpo.

Pero, a la vez, esos reflejos garantizan que los órganos no reaccionen en exceso ante los estímulos: mediante señales nerviosas, inhiben la producción de moléculas inmunitarias que causan inflamación.

La estimulación eléctrica de las fibras nerviosas a través de la implantación de un dispositivo médico podría ayudar al organismo a suprimir la inflamación.

Se conoce como medicina bioelectrónica la nueva disciplina que emplea la estimulación eléctrica para tratar la inflamación y otras enfermedades.


RÓNICA


Kevin J. Tracey es presidente del Instituto Feinstein de Investigación Médica, del Sistema de Salud North Shore-Long Island Jewish (Manhasset, Nueva York), donde dirige el Laboratorio de Ciencia Biomédica. Es profesor de medicina molecular y neurocirugía en la facultad de medicina de Hofstra y North Shore-Long Island Jewish.



Soy un neurocirujano fascinado por la inflamación. En el laboratorio me dedico a estudiar, junto con mis colaboradores, las moléculas que la causan. Con ello pretendemos desarrollar métodos que alivien el dolor, la hinchazón y el daño tisular ocasionados por numerosas enfermedades.

Parte de este trabajo ya ha logrado mejorar la vida de los pacientes. En 1987 publiqué los resultados de un experimento en el que se actuaba sobre una molécula inflamatoria, el factor de necrosis tumoral (TNF, por sus siglas en inglés), con el fin de salvar a mandriles de laboratorio de las consecuencias de una infección letal. El estudio contribuyó al descubrimiento de un nuevo tipo de fármacos para tratar enfermedades inflamatorias y autoinmunitarias, entre otras que alteran el sistema defensivo del organismo.

Como neurocirujano también estoy muy interesado en el funcionamiento del cerebro. A finales de los años noventa del siglo xx hicimos un hallazgo sorprendente, también relacionado con el TNF, que enlazaba conocimientos de la neurociencia y la inmunología. Descubrimos, de modo accidental, que los reflejos neurológicos (respuestas predecibles a ciertos estímulos sensoriales) anulaban la producción de TNF. A partir de este resultado, diseñamos un dispositivo electrónico para tratar la inflamación mediante el implante de pequeños estimuladores nerviosos.

El empleo de estos dispositivos para reducir la inflamación y revertir sus efectos negativos sobre la salud constituye la base de una nueva disciplina, la medicina bioelectrónica. La estrategia, que se está ensayando en pacientes con artritis reumatoide y otras enfermedades, se basa en una idea sencilla: aprovechar los reflejos naturales del organismo para desarrollar una serie de métodos eficaces, seguros y económicos como alternativa al uso de comprimidos y medicamentos inyectables. Al ir dirigida contra procesos biológicos causantes de enfermedades, la técnica de la estimulación nerviosa ayudaría a evitar los efectos adversos de numerosos fármacos.

EL CIRCUITO REFLEJO

El calor, el tacto, la presión, la luz y la presencia de ciertas moléculas genera una señal eléctrica en unas células nerviosas llamadas neuronas sensoriales. Esta información eléctrica se transfiere a las «interneuronas», otro tipo de células nerviosas que transmiten el impulso hasta las neuronas motoras, completándose el tercer paso del sencillo circuito reflejo. La activación de las neuronas motoras origina señales eléctricas de vuelta hacia los músculos y órganos, lo que da lugar a distintas respuestas que van desde retirar el dedo de un plato caliente hasta dilatar las vías respiratorias durante una carrera de larga distancia.

Los circuitos reflejos armonizan la actividad de cada órgano y nos evitan la necesidad de planificar todo el tiempo cada una de las acciones que mantienen nuestro cuerpo en funcionamiento. Cuando saltamos de la silla y corremos escaleras arriba para contestar al teléfono, no tenemos que pensar en coordinar la respiración, el ritmo cardíaco y la presión arterial. Los reflejos se ocupan de todo lo esencial para adaptar la función de los órganos a las necesidades del cuerpo, ya se trate de estar sentado cómodamente o correr a toda velocidad.

El médico inglés Charles Scott Sherrington (1857-1952), ganador de un premio Nobel, propuso que los circuitos neuronales responsables de los reflejos simples constituían los cimientos del sistema nervioso. El funcionamiento de los órganos depende de la combinación de millones de impulsos nerviosos que intervienen en los reflejos. Sin embargo, Sherrington no abordó una cuestión pendiente: ¿de qué modo las señales eléctricas que atraviesan las neuronas motoras controlan la función de los órganos? La respuesta es bastante simple: mediante la producción de compuestos químicos. Las neuronas transmiten la información a lo largo de las fibras o axones nerviosos, unas largas extensiones parecidas a unos cables que acaban en los órganos a los que regulan. Al final del axón se halla la «sinapsis», según el término acuñado por el propio Sherrington. A un lado de ella se sitúa el axón de la neurona motora y, al otro, un nervio o un órgano, pero no hay contacto físico entre ambas partes, sino un estrecho hueco llamado hendidura sináptica. Los impulsos eléctricos que llegan al final del axón no son transmitidos a través de la sinapsis, sino que estimulan la liberación de neurotransmisores, los cuales se propagan a lo largo de la hendidura sináptica y se unen a los receptores que hay en los nervios u órganos sobre los que actúan. Estas moléculas neurotransmisoras que se fijan a los receptores del otro lado de la hendidura alteran la función de las células diana de una manera muy similar a como lo hacen muchos fármacos.

La industria farmacéutica invierte miles de millones de dólares en diseñar, sintetizar y desarrollar nuevas sustancias que,

PÁGINAS ANTERIORES: BRYAN CHRISTIE

al igual que los neurotransmisores, interactúen con los receptores. De hecho, muchos medicamentos superventas se unen de modo selectivo a unos receptores que modifican la actividad metabólica y activan ciertos genes en determinadas células. Sin embargo, los fármacos pueden causar efectos indeseados. Una vez ingeridos o inyectados, se distribuyen por todo el cuerpo y en ocasiones producen efectos secundarios nocivos al intervenir sobre células que no eran su objetivo.

El empleo de un dispositivo que envíe señales a lo largo de los nervios para estimular la producción de moléculas como los neurotransmisores presenta una ventaja clara. Las sustancias son liberadas por el propio cuerpo en dosis no tóxicas para que actúen en tejidos específicos y en el momento adecuado, con lo que se reducen los efectos indeseados.

UN DESCUBRIMIENTO ACCIDENTAL

A finales de los años noventa se comenzaba a usar un nuevo tipo de medicamentos, los anticuerpos monoclonales, en el tratamiento de la artritis reumatoide o la enfermedad inflamatoria intestinal, entre otros trastornos. Estos anticuerpos, en cuyo desarrollo participó nuestro equipo, alivian el dolor, la hinchazón, el daño en los tejidos y otros síntomas de la inflamación causados por la producción excesiva de TNF y otras moléculas. El tratamiento ofrece a muchos pacientes la única posibilidad de llevar una vida normal. Sin embargo, posee un elevado coste, de 15.000 a 30.000 dólares anuales por persona, y, además, no funciona en el 50 por ciento de los casos. Y lo que quizá resulte más preocupante para los pacientes y sus cuidadores: estos medicamentos pueden causar efectos secundarios peligrosos e incluso letales.

En nuestro laboratorio, ahora en el Instituto Feinstein de Investigación Médica en Manhasset (Nueva York), intentábamos desarrollar otra manera de inutilizar el TNF mediante una molécula a la que habíamos llamado CNI-1493. Nuestra hipótesis inicial planteaba que la inyección de esta molécula directamente en el cerebro evitaría las producción de TNF durante un infarto cerebral o ictus. Si bien se demostró que así era, lo realmente sorprendente fue descubrir que la administración de cantidades ínfimas de CNI-1493 en el cerebro inhibía también la síntesis de TNF en órganos de todo el cuerpo. En un primer momento desconfiamos de este resultado, pero acabó confirmándose todas las veces que repetimos el experimento. Concentraciones insignificantes de CNI-1493 en el cerebro, demasiado bajas para llegar a otros órganos, impedían que el TNF actuara en ellos. Durante meses debatimos sobre estos resultados en los seminarios semanales de laboratorio, pero no conseguíamos siquiera acercarnos a comprender el mecanismo de aquel fármaco.

Al principio pensábamos que CNI-1493 quizás activaría la hipófisis, glándula situada en la base del cerebro, con lo que se estimularía la producción de hormonas esteroideas, o glucocorticoides, entre otras, que a su vez inhibirían la producción de TNF en los distintos órganos. Pero si eliminábamos la glándula en ratas y repetíamos el experimento, la inyección de CNI-1493 en el cerebro todavía inhibía la producción de TNF, lo que indicaba que la hipófisis no transmitía las señales responsables de este efecto. En busca de otra explicación, comenzamos a plantearnos la remota posibilidad de que las neuronas motoras que emergían del cerebro emitieran impulsos eléctricos que anularan el TNF en el resto del cuerpo.

Para comprobar esa hipótesis empleamos la práctica habitual utilizada en neurociencia para establecer una relación entre un área concreta del cerebro y una conducta determinada. Mucho de lo que se conoce sobre el control nervioso del comportamiento se basa en los primeros estudios realizados con pacientes de ictus que sufrían daño cerebral localizado. Paul Broca (1824-1880) observó que la lesión en una pequeña zona de la corteza frontal posterior izquierda afectaba al habla sin por ello alterar la capacidad de comprensión, una patología denominada afasia expresiva. Carl Wernicke (1848-1905) también observó que el daño por ictus en una zona cercana (la circunvolución temporal superior posterior izquierda) producía afasia sensorial, la incapacidad de entender y hablar de manera comprensible [*véase* «Afasia de Wernicke», por Patrick Verstichel; Mente y Cerebro, noviembre/diciembre de 2005]. Basándonos en la idea de que determinadas áreas cerebrales controlan comportamientos concretos, nos dispusimos a verificar si, al interrumpir las distintas conexiones entre el cerebro y los órganos, podríamos revelar la identidad de los nervios que controlaban la producción de TNF. Pero como existen millones de tales conexiones, no sabíamos ni por dónde empezar.

Mientras estábamos decidiendo cómo abordar la tarea, llegó a nuestras manos un artículo fundamental de Linda Watkins, de la Universidad de Colorado en Boulder, en el que demostraba que el nervio vago resulta esencial en la transmisión de la información sensorial desde los órganos hasta la base del cerebro. En sus experimentos, Watkins administraba a ratas una molécula de señalización, la interleucina 1 (IL-1), que causa inflamación y fiebre. Si la inyectaba en el abdomen, la temperatura corporal aumentaba; pero si cortaba el nervio vago y repetía el experimento, la fiebre desaparecía. Llegó a la conclusión de que el nervio enviaba información al cerebro sobre la presencia de IL-1, una señal que daba lugar a la aparición de fiebre.

Mientras tanto, en la facultad de medicina de la Universidad de Niigata, Akira Niijima también inyectaba IL-1 en ratas. Descubrió que la molécula estimulaba la actividad eléctrica del nervio vago hacia el cerebro. Todos estos datos me parecieron la clave para identificar un circuito reflejo del sistema inmunitario.

Si teníamos en cuenta las consecuencias de las señales del nervio vago estimuladas por la IL-1, parecía razonable pensar que existiera una señal motora correspondiente que volviera hacia los órganos desde el cerebro para regular el proceso inflamatorio. Este proceso tendría lugar si las señales iniciadas por las moléculas inflamatorias en los tejidos no solo viajaran por el nervio vago hasta el cerebro, sino que también regresaran a los tejidos originales, y de esta manera inhibieran la producción de TNF y otras moléculas inflamatorias conocidas globalmente como citocinas.

Ateniéndonos a la idea de Sherrington de que los reflejos simples se inician con un estímulo sensorial que se desplaza a lo largo de un nervio, propusimos que las señales que inhibían

¿De qué modo las señales nerviosas eléctricas regulan la función de los órganos? La respuesta es sencilla: a través de la producción y liberación de compuestos químicos

el TNF desde el vago formaban un circuito reflejo entre el cerebro y el sistema inmunitario. Este mecanismo modificaría notablemente nuestra manera de entender la defensa del organismo frente a lesiones e infecciones. Entonces se me ocurrió que quizá los circuitos nerviosos que controlan la inmunidad activasen procesos beneficiosos para la salud (al contrario de la inflamación, que resulta patológica), al impedir la producción tóxica de TNF y otras moléculas de señalización inflamatorias. Pero de inmediato temí que esta idea ya se la habría planteado antes alguien, teniendo en cuenta lo aparentemente obvio del mecanismo.

En la bibliografía resultaba evidente que los órganos más importantes del sistema inmunitario, como el timo, el bazo, el hígado, los ganglios linfáticos y los pulmones, están inervados por fibras que descienden del cerebro. Sin embargo, ninguno de los trabajos consultados identificaba el control del sistema inmunitario por medio de circuitos reflejos y, de hecho, lo contrario se había convertido en un dogma médico. Durante décadas, los estudios de inmunología se habían centrado en descifrar cómo el sistema inmunitario protegía el cuerpo de manera independiente al sistema nervioso. Así, las defensas se basaban en la acción de los linfocitos, los monocitos, los macrófagos y otros glóbulos blancos, pero no en las neuronas.

Bauticé con el nombre de «reflejo inflamatorio» al mecanismo que mantiene el sistema inmunitario ni con mucha ni con poca actividad, lo cual evita toxicidad y daño tisular. Si el reflejo inflamatorio no funcionaba bien, la presencia excesiva de citocinas generaría las complicaciones típicas de las enfermedades autoinmunitarias, como la artritis reumatoide. Parecía una buena teoría pero todavía faltaba la demostración experimental.

Para verificar esa idea se requería de un proceso minucioso en el que se cortaría mediante cirugía el nervio vago en varios puntos de su trayecto desde el cerebro hasta los órganos. El nervio emerge del tronco encefálico (a la altura del oído en humanos) y se separa, a izquierda y derecha, en haces paralelos de fibras nerviosas que descienden a través del cuello, tórax y abdomen. A lo largo de esta trayectoria, se conecta de manera directa o indirecta con la mayoría de los órganos. Trabajamos con ratas anestesiadas y cortamos el vago a nivel del cuello; tras inyectar CNI-1493 en el cerebro, medimos el nivel de TNF en él, el bazo y otros órganos. Obtuvimos resultados convincentes: para que la molécula CNI-1493 inyectada en el cerebro impidiera que las células inmunitarias sintetizaran TNF en los distintos órganos, se necesitaba que el nervio vago se hallara inalterado. Seguimos realizando cortes en otras partes del vago. La inhibición de TNF solo se producía cuando el nervio se mantenía intacto en toda su trayectoria, desde el tronco encefálico, siguiendo por el cuello, tórax y abdomen, hasta el bazo.

La prueba definitiva de que la transmisión del nervio vago puede anular la producción de TNF en el bazo la obtuvimos al emplear un electrodo de estimulación nerviosa manual que conseguí en el quirófano de neurocirugía del Hospital Universitario North Shore. Ya lo había utilizado a menudo para identificar los nervios faciales y evitar dañarlos cuando estaba extirpando un tumor cerebral. Este aparato a pilas, parecido a esas linternas que llevan los médicos en los bolsillos de la bata, tiene un pequeño cable que emerge de la punta donde se ubicaría la bombilla en una linterna. Cuando se posiciona sobre un nervio, la punta emite una corriente eléctrica que genera potenciales de acción en las fibras nerviosas, esto es, la transmisión de información eléctrica a través ellas.

Cuando apliqué el electrodo al nervio vago de las ratas anestesiadas, se interrumpió la producción de TNF en varios órganos. Era la prueba de que la transmisión eléctrica del vago regulaba la producción de TNF

EN BUSCA DE NUEVAS TERAPIAS

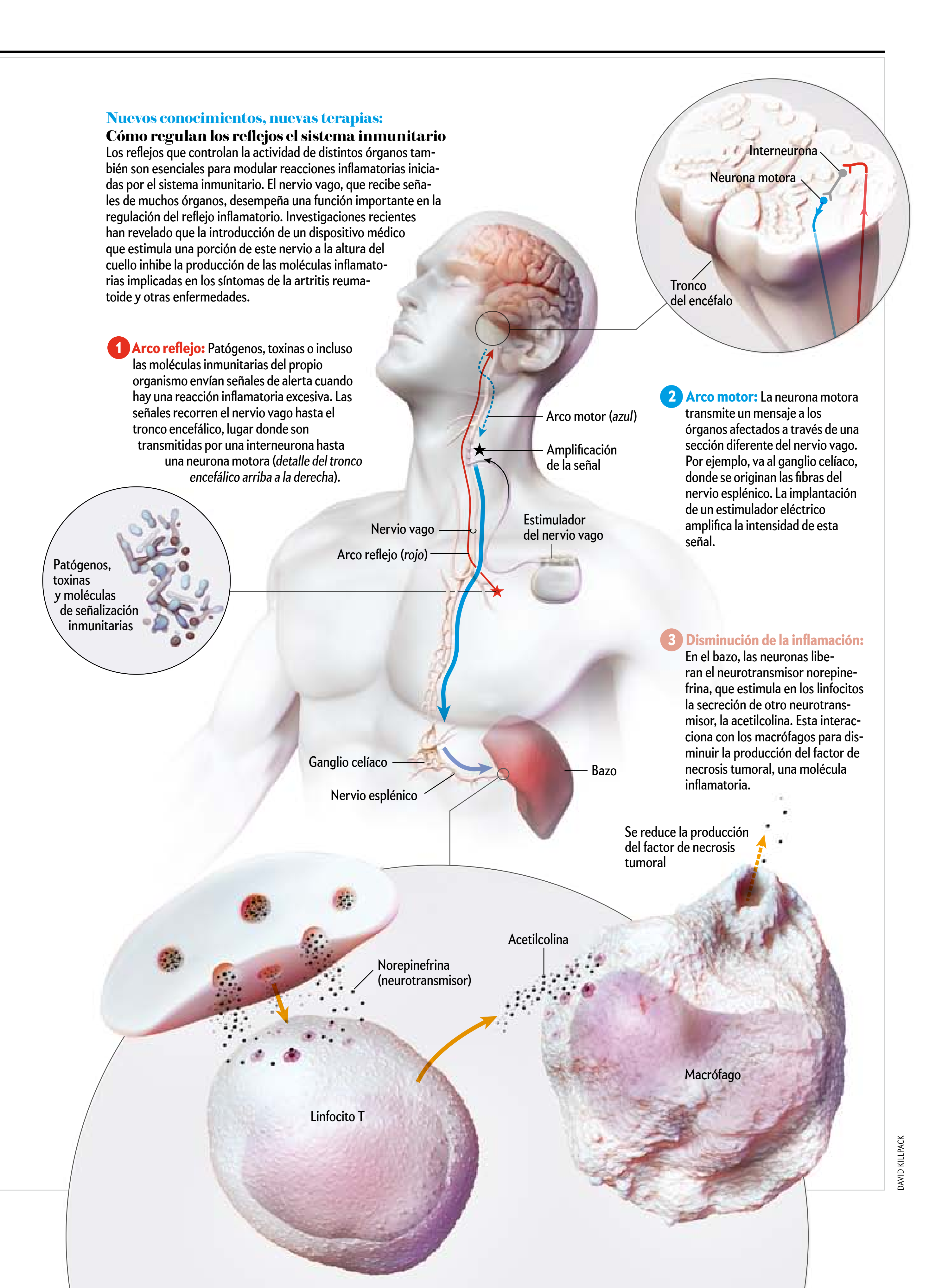
Reflejos e inflamación

El sistema nervioso recibe señales de todas las partes del cuerpo y las procesa para que los distintos órganos funcionen correctamente. Cuando tocamos un objeto caliente, tenemos el reflejo de apartar la mano de manera automática. De igual modo, los reflejos se encargan de disminuir la inflamación, por lo que podrían emplearse como tratamientos que sustituyan a los fármacos antiinflamatorios.

Los reflejos nos ayudan a evitar daños

Cuando nuestra mano pasa por encima de la nube de vapor de una tetera, se inicia un conjunto de sucesos en nervios y músculos conocido como reflejo. Una neurona de la mano envía una señal eléctrica a lo largo del arco reflejo, una vía nerviosa que va de la mano a la medula espinal, donde una interneurona transmite la señal a una neurona motora. Esta última manda una orden que viaja en sentido inverso hacia el brazo por una larga extensión nerviosa que surge del soma neuronal. Unas vesículas en la terminación nerviosa liberan neurotransmisores que cruzan la hendidura sináptica e interaccionan con receptores en las células musculares. Como resultado, el músculo se contrae y la mano se retira.

Médula espinal
Interneurona
Neurona motora
El arco motor (*azul*) activa el reflejo muscular (*detalles celulares del proceso, abajo*)
Arco reflejo (*rojo*)
Neurona
Vesícula sináptica
Hendidura sináptica
Neurotransmisores
Receptores
Células musculares


Nuevos conocimientos, nuevas terapias:
Cómo regulan los reflejos el sistema inmunitario
Los reflejos que controlan la actividad de distintos órganos también son esenciales para modular reacciones inflamatorias iniciadas por el sistema inmunitario. El nervio vago, que recibe señales de muchos órganos, desempeña una función importante en la regulación del reflejo inflamatorio. Investigaciones recientes han revelado que la introducción de un dispositivo médico que estimula una porción de este nervio a la altura del cuello inhibe la producción de las moléculas inflamatorias implicadas en los síntomas de la artritis reumatoide y otras enfermedades.
Interneurona
Neurona motora
Tronco del encéfalo
1 Arco reflejo: Patógenos, toxinas o incluso las moléculas inmunitarias del propio organismo envían señales de alerta cuando hay una reacción inflamatoria excesiva. Las señales recorren el nervio vago hasta el tronco encefálico, lugar donde son transmitidas por una interneurona hasta una neurona motora (detalle del tronco encefálico arriba a la derecha).
Arco motor (azul)
Amplificación de la señal
2 Arco motor: La neurona motora transmite un mensaje a los órganos afectados a través de una sección diferente del nervio vago. Por ejemplo, va al ganglio celíaco, donde se originan las fibras del nervio esplénico. La implantación de un estimulador eléctrico amplifica la intensidad de esta señal.
Nervio vago
Arco reflejo (rojo)
Estimulador del nervio vago
Patógenos, toxinas y moléculas de señalización inmunitarias
3 Disminución de la inflamación: En el bazo, las neuronas liberan el neurotransmisor norepinefrina, que estimula en los linfocitos la secreción de otro neurotransmisor, la acetilcolina. Esta interacciona con los macrófagos para disminuir la producción del factor de necrosis tumoral, una molécula inflamatoria.
Ganglio celíaco
Nervio esplénico
Bazo
Se reduce la producción del factor de necrosis tumoral
Acetilcolina
Norepinefrina (neurotransmisor)
Macrófago
Linfocito T
DAVID KILLPACK

en el sistema inmunitario. El experimento nos hizo pensar en la posibilidad de usar dispositivos bioelectrónicos para tratar enfermedades inflamatorias. Ese día, a la hora de la comida dibujé en una servilleta un boceto de marcapasos conectado a un electrodo situado en el pecho de un paciente con artritis reumatoide u otra enfermedad inflamatoria. A pesar de que suelo conservar las cosas, parece que perdí esa servilleta. Una pena, porque hoy sería un bonito recuerdo.

Después de más de una década de trabajo en nuestro laboratorio y otros centros de todo el mundo, hemos conseguido establecer el mecanismo fisiológico y molecular del reflejo inflamatorio. El nervio vago, eje central de la mayor parte de esta investigación, manda señales desde el cerebro al bazo, hígado, tubo digestivo, corazón y otros órganos. Muchos de estos estudios se han centrado en el bazo por su alta producción de TNF. En esta ruta los potenciales de acción descienden por el vago a través del abdomen y acaban en el ganglio celíaco, un grupo de neuronas que conecta sus fibras con el bazo. Estas fibras liberan en el órgano una molécula señalizadora llamada norepinefrina que se une a unas células inmunitarias, los linfocitos T. La norepinefrina se fija a receptores en los linfocitos y provoca la liberación de otro neurotransmisor, la acetilcolina, que a su vez se une a receptores en otras células inmunitarias, los macrófagos, que producen TNF en el bazo. La unión de acetilcolina con su receptor (abreviado, α7 nAChR) en los macrófagos interrumpe la síntesis de TNF al inhibir dos vías moleculares.

Una de ellas controla la actividad de una proteína, NF-κB, que dirige la producción de TNF a través del control de ciertos genes del núcleo. La otra vía dirige la liberación de IL-1 y otras moléculas inflamatorias. Investigaciones futuras examinarán los otros órganos inervados por el vago e identificarán otros nervios que interaccionen con el sistema inmunitario.

Al definir las bases anatómicas y moleculares de estas vías, se ha demostrado que la respuesta inmunitaria se halla sometida al control del sistema nervioso. Cuando una infección o una lesión crean un desequilibrio bioquímico, estos cambios son transmitidos a las neuronas motoras en el cerebro. Estas devuelven la señal a los tejidos afectados para regular la liberación de TNF, IL-1 y otras moléculas en los tejidos y el torrente sanguíneo, que generan reacciones inflamatorias por todo el cuerpo.

El desarrollo de nuevas técnicas para estudiar y controlar esas vías está progresando con rapidez. Mientras que hoy medimos citocinas para monitorizar la evolución de una inflamación, en el futuro descifraremos las señales eléctricas de los nervios como un método para diagnosticar, vigilar y supervisar las enfermedades autoinmunitarias.

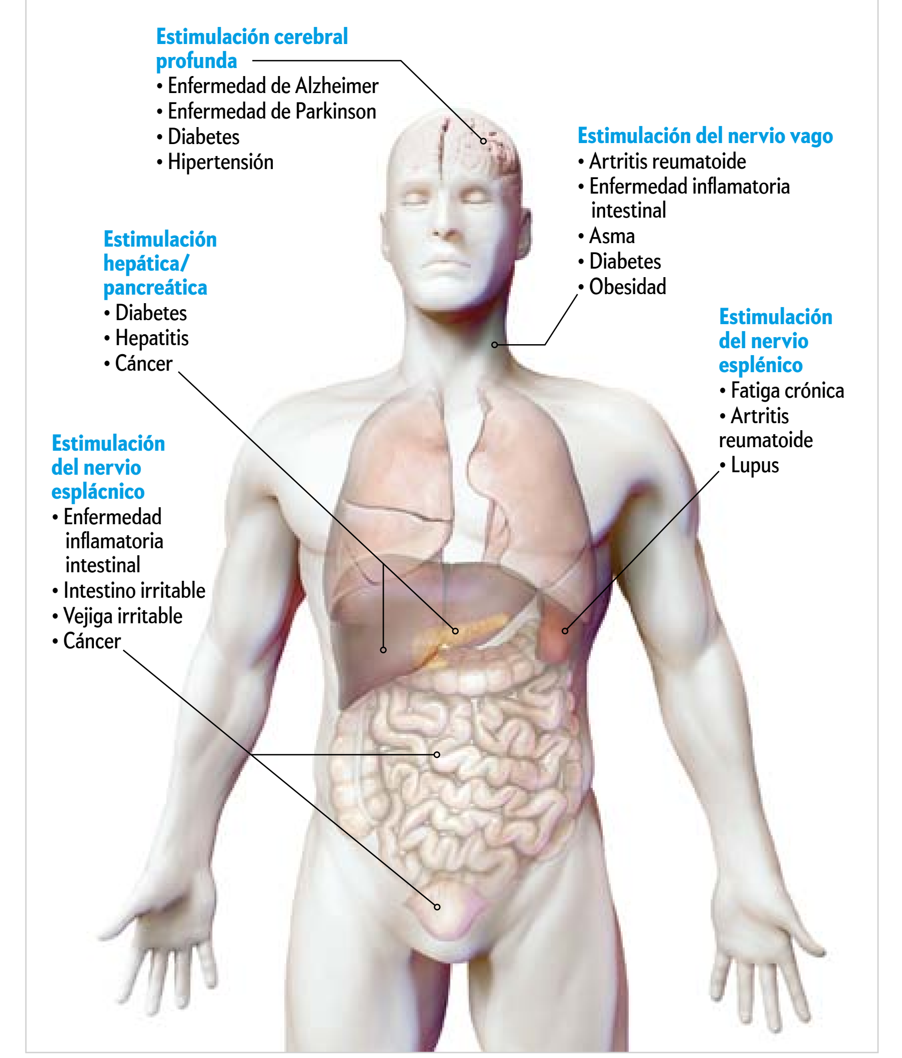
Como hemos demostrado, los circuitos nerviosos que controlan la respuesta inmunitaria pueden cartografiarse mediante el corte y la estimulación de nervios y el posterior estudio de las vías que activan genes y moléculas inflamatorias. Los resultados obtenidos hasta ahora hacen pensar que estas estrategias ayudarán en el tratamiento de enfermedades como la artritis reumatoide, la enfermedad inflamatoria intestinal, la esclerosis múltiple y quizá también la diabetes y el cáncer.

En 2011, en Mostar, 13 años después de aquel boceto en la servilleta, conocí al primer paciente de artritis reumatoide tratado con un estimulador del nervio vago, una versión avanzada del simple dispositivo manual que había utilizado en mi laboratorio. Se trataba de un padre de mediana edad con hijos pequeños, y me comentó que le dolían tanto las manos, los pies y las rodillas que se pasaba los

OBJETIVOS Y ENFERMEDADES

Dónde intervenir

La medicina bioelectrónica ofrece la esperanza de utilizar técnicas de estimulación eléctrica para tratar diferentes enfermedades y de convertirse en una opción alternativa al empleo de fármacos. La estimulación del nervio vago, tema central de este artículo, es una de estas técnicas. La estimulación cerebral profunda ya está ayudando a pacientes con párkinson. Se están investigando otras terapias, como la estimulación del nervio esplénico, pero no han alcanzado la fase de ensayos clínicos todavía.



DAVID KILLPACK

días tumbado en el sofá, incapaz de trabajar, jugar con sus niños o disfrutar de la vida. Al no poder acceder a la costosa terapia anti-TNF en su país, había intentado sin éxito el tratamiento con esteroides, metotrexato y otros medicamentos antiinflamatorios. Aceptó participar en un ensayo clínico dirigido por Paul-Peter Tak, prestigioso reumatólogo del Centro Médico Académico, de la Universidad de Ámsterdam, y de GlaxoSmithKline (GSK). Los neurocirujanos le implantaron un estimulador del nervio vago justo por debajo de la clavícula. En pocos días notó mejoría, y a la semana casi no le dolía nada. Comenzó a jugar al ping-pong y pronto pasó a otras actividades deportivas, como el tenis. En ese momento se lesionó una rodilla. El equipo clínico le recomendó que abandonara los grandes esfuerzos físicos. Ahora, casi cuatro años después de la operación, permanece sin síntomas y sin necesidad de tomar fármacos, que en el caso de los esteroides pueden aumentar el riesgo de infección, diabetes e hipertensión.

Este caso fue presentado en la reunión de noviembre de 2012 del Colegio Americano de Reumatología en Washington, D.C., por Tak, su colaboradora Frieda Koopman, del Centro Médico Académico, y Ralph Zitnik, de SetPoint Medical, compañía que cofundé para desarrollar la técnica del estímulo nervioso en la regulación del reflejo inflamatorio. De un total de ocho pacientes que llevaban sufriendo artritis reumatoide durante años, el hombre mencionado arriba y otros cinco mejoraron perceptiblemente después de la implantación quirúrgica de un estimulador del nervio vago. En el momento de redactar este artículo, hay nuevos estudios en marcha para evaluar la estimulación del vago en la enfermedad inflamatoria intestinal como complemento de las terapias farmacológicas. Si los resultados son buenos, la posibilidad de que la medicina bioelectrónica sustituya a los fármacos se habrá hecho realidad.

Los progresos en el campo continúan. A mediados de enero, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. aprobó un dispositivo que estimula el nervio vago para inducir una sensación de saciedad en pacientes obesos. Las perspectivas de la medicina bioelectrónica fueron discutidas en la primera cumbre sobre la disciplina en 2013, que fue gestionada por GSK para trazar la trayectoria de las investigaciones. La empresa anunció un premio de la innovación de 1 millón de dólares, además de los 50 millones que había destinado a proyectos de investigación individuales. Por otro lado, los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. anunciaron hace poco un programa de 248 millones de dólares durante siete años denominado SPARC (por las siglas, en inglés, de Estimulación de la Actividad Periférica para el Tratamiento de Enfermedades), que pretende impulsar el desarrollo de las técnicas bioelectrónicas. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de EE.UU., por su parte, ha lanzado ElectRx (Prescripciones Eléctricas) para financiar estudios sobre métodos que promuevan la salud al intervenir sobre los nervios.

Nuestra estrategia inicial de examinar los mecanismos moleculares responsables del reflejo inflamatorio se está aplicando ahora en otras enfermedades de los sistemas inmunitario, cardiovascular, respiratorio, gastrointestinal, neuroendocrino y renal. El conocimiento que se está generando sobre los circuitos nerviosos específicos gracias al empleo de finísimos electrodos y herramientas moleculares determinará nuestra capacidad de estimular fibras nerviosas pequeñas o incluso axones individuales.

Podría plantearse la pregunta de si el campo de la medicina bioelectrónica constituye una amenaza para la industria farmacéutica. Creo que los dispositivos bioelectrónicos sustituirán a algunos fármacos y complementarán a otros. Aunque los antibióticos y otros medicamentos contra la infección sin duda permanecerán, es muy probable que las compañías farmacéuticas continúen aumentando sus inversiones en medicina bioelectrónica.

MENTE E INMUNIDAD

La mayoría de nosotros no pensamos mucho en los reflejos, a pesar de su omnipresencia. Algunos animales primitivos, como ciertos gusanos que carecen de cerebro o consciencia, confían en sus reflejos para hallar alimento y pareja, evitar depredadores, y protegerse contra infecciones y lesiones. Fijémonos en *Caenorhabditis elegans*, un nemátodo muy alejado de nosotros en la escala evolutiva que se alimenta de las bacterias del suelo. A veces se tropieza con algunas que son patógenas, lo cual activa una serie de contramedidas en su sistema inmunitario. La evolución favorece las especies que presenten una reacción coordinada, con efectos secundarios mínimos, ante una amenaza de infección o lesión. El gusano ha desarrollado un mecanismo elegante para tal fin: algunas de las 302 neuronas que constituyen su sencillo sistema nervioso son sensibles a la presencia de patógenos. Esas mismas neuronas accionan un circuito reflejo que controla la actividad del sistema inmunitario, con lo que se evita que la respuesta defensiva resulte tóxica para el gusano.

En los vertebrados superiores, los dos sistemas biológicos que aprenden a través de la experiencia a defender el organismo son los sistemas nervioso e inmunitario. El descubrimiento del reflejo inflamatorio reveló que ambos se comunican a través de circuitos reflejos simples para mantener la homeostasis inmunitaria. Al igual que el humilde gusano, nosotros tampoco precisamos ser conscientes de estos mecanismos para beneficiarnos de su increíble función protectora.

Hemos llegado a un momento único en la historia de la medicina. Hay reflejos simples distribuidos por todo el sistema nervioso. En los humanos, billones de sinapsis conectan las neuronas entre sí. Y hoy nuestros instrumentos científicos son lo bastante sensibles para poder identificar los circuitos concretos que controlan el sistema inmunitario y usarlos en el tratamiento de enfermedades. A principios del siglo xx, Sherrington atribuyó la preponderancia de los humanos en la Tierra a la capacidad de nuestras regiones cerebrales con funciones superiores de dominar los reflejos primitivos, y destacó que los «arcos reflejos son controlables por mecanismos relacionados con la consciencia». Por aquel entonces, él no habría podido prever el advenimiento de las técnicas para regular los reflejos y equilibrar los procesos inflamatorios del sistema inmunitario. Pero ese momento ha llegado ya.

Vínculos comerciales del autor: Kevin J. Tracey cofundó y trabaja como consultor en SetPoint Medical. El Instituto Feinstein de Investigación Médica ha solicitado las patentes relacionadas con el trabajo resumido aquí. Tracey ha recibido financiación de GSK.

PARA SABER MÁS

The inflammatory reflex. Kevin J. Tracey en *Nature*, vol. 420, págs. 853-859, diciembre de 2002.

Reflex principles of immumological homeostasis. Ulf Andersson y Kevin J. Tracey en *Annual Review of Immunology*, vol. 30, págs. 131-335, abril de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Neuromodulación contra la depresión resistente. Andrés M. Lozano et al. en *MyC* n.º 55, 2012.

PESQUERÍAS

En China, un grupo de científicos y empresarios está rediseñando las piscifactorías para satisfacer la demanda de pescado del país y, al mismo tiempo, salvar los océanos del mundo

Erik Vance

Hacia una acuicultura *más* sostenible

EN EL LAGO LIANGZI, las redes delimitan zonas cultivadas por dos empresas diferentes. La productividad de las piscifactorías continentales debe crecer para aliviar la sobrepesca en el mar.


Erik Vance es escritor científico. Se interesa principalmente por temas de oceanografía y neurociencia.



En enero de 2007, Nguyên Phú estaba preparando su barca para lo que parecía ser otro día más dedicado a la pesca del pulpo frente a las costas vietnamitas. Poco después de otear el horizonte, vio aparecer varios barcos chinos. Por un momento pensó en huir, pero sabía que no llegaría lejos. Cuando los barcos de guerra se aproximaron a su embarcación, él y su tripulación se rindieron sin oponer resistencia. «No queríamos problemas con los chinos», comenta. «Simplemente nos pusimos así» —se pone en cuclillas con las manos sobre la cabeza— «y rezamos a Dios pidiendo poder contarlo.»

Afirma que les llevaron a una prisión situada en una isla cercana y les confiscaron la barca. Phú pasó más de un mes en una pequeña celda y fue golpeado diariamente, según declaran él y su tripulación. Luego, le liberaron; sin juicio, sin ver al juez y sin ninguna explicación. Los militares lo habían capturado y después soltado, igual que a un pez.

La historia de Phú, que me explicó en agosto de 2014, se corresponde con la actitud desafiante que viene mostrando China en los últimos años en las aguas del Pacífico próximas al sudeste asiático. La pesca furtiva de este país en las reservas marinas de Japón ha tensado aún más las relaciones entre las dos naciones, ya tirantes de por sí. Filipinas está incrementando su presencia militar en las proximidades de ciertos bajíos situados frente a sus costas y visitados por pesqueros chinos. La respuesta de China es que el mar de China Meridional había formado parte de su territorio durante cientos de años.

Lo que nadie discute es el apetito del país por los productos del mar. A medida que aumenta su nivel de vida, la demanda de pescado y marisco se dispara. El consumo per cápita allí es un 50 por ciento superior al de Estados Unidos. Los 14.000 millones de habitantes chinos consumen más pescado que la población total de los siguientes diez países que más consumen.

Para satisfacer la creciente demanda, en 2102 China produjo 57 millones de toneladas de pescado, tanto silvestre como de cultivo, lo que, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, representa un tercio del total mundial. En la actualidad, el país dispone de 700.000 buques de pesca faenando en las aguas de todo el mundo. Sus barcos arrastran enormes aparejos sobre los fondos oceánicos y levan a través de la columna de agua redes del tamaño de un campo de fútbol. Otras naciones emplean técnicas similares, pero China supera incluso a Japón y a Estados Unidos como el principal responsable del agotamiento de las pesquerías del planeta.

Una consecuencia de ello es que la población de numerosas especies ampliamente demandadas en la cocina china, como los pepinos de mar, los tiburones y las orejas de mar, disminuye sin cesar en todo el mundo. Al margen de medidas simbólicas, entre ellas la prohibición de servir sopa de aleta de tiburón en las recepciones oficiales, hasta el momento el Gobierno chino se ha mostrado reacio a reconocer el problema.

Pero algunos científicos y empresarios del país, preocupados por el hecho de que los sistemas de pesca modernos estén mermando los océanos del mundo, están empezando a afrontar la situación. Un puñado de estos visionarios intenta invertir la tendencia mediante un nuevo concepto de la acuicultura china: convertir los miles de pequeñas piscifactorías continentales, que aún emplean métodos viejos, en inmensas granjas marinas.

Su objetivo consiste en transformar los sistemas de cultivo tradicional, anticuados, poco eficientes y contaminantes, en un nuevo modelo totalmente chino de producir pescado de forma sostenible, al tiempo que ayudan a los acuicultores, grandes y pequeños, a prosperar. Esperan que el deseo del consumidor de adquirir pescado no contaminado y saludable les permita presentar su acuicultura como una alternativa a las prácticas habituales. Si los investigadores y los empresarios hallan un modo sostenible de satisfacer la demanda de las principales especies tradicionales, como las carpas de agua dulce, habrán recorrido un buen trecho en el camino hacia la prevención del colapso de las pesquerías mundiales.

ACUICULTURA A GRAN ESCALA

Las aguas de la granja marina próxima a la isla de Zhangzi, cerca de Corea, son frías y se dice que producen el mejor marisco del mundo. La cala concreta en la que me dispongo a sumergirme es famosa porque de ahí procedían las orejas de mar que fueron servidas en 1972 en el banquete en honor de Richard Nixon,

EN SÍNTESIS

China produce un tercio del pescado mundial y consume más que los diez siguientes países más consumidores juntos. Su capacidad para reinventar la acuicultura continental y marina con el fin de reducir la pesca extractiva determinará la supervivencia o el colapso de las pesquerías en el planeta.

Algunos científicos y empresarios están rediseñando las operaciones de acuicultura marina para conseguir que unas especies reciclen los efluentes de otras, de modo que las explotaciones resulten menos contaminantes y más sostenibles. Intentan hacer lo mismo con los miles de piscifactorías continentales de cualquier tamaño, que suministran el 70 por ciento del pescado del país.

Hasta el momento, el pescado producido de esa manera resulta caro; se necesita reducir los costes para lograr una amplia difusión de estos productos entre los consumidores chinos.







LA GRANJA ZHANGZIDAO aprovecha las corrientes marinas para llevar los nutrientes de unas especies a otras. Los acuicultores seleccionan vieiras jóvenes antes de colocarlas en el agua (*abajo*); bucean (*izquierda*) para comprobar el crecimiento de los pepinos de mar (*arriba, izquierda*); y preparan grandes bloques construidos con las conchas recicladas de vieiras (*arriba*) que emplearán para dirigir las corrientes.

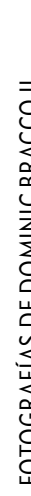


durante la histórica visita que abrió las relaciones comerciales con China.

Hoy el aire es cálido y el traje de neopreno que visto, de siete milímetros de grosor, resulta sofocante en los minutos previos a la inmersión junto a dos guías y un fotógrafo. Mis acompañantes son pescadores del Grupo Zhangzidao, una antigua empresa de acuicultura que hoy experimenta con una nueva idea. Se muestran bastante amistosos, aunque también algo reticentes. Somos los primeros periodistas extranjeros que visitamos el lugar.

A medida que descendemos por las oscuras aguas, vemos lo que parece un ecosistema litoral ordinario: fanerógamas marinas, grandes algas laminariales y amplias zonas arenosas. Entonces caigo en la cuenta de que el fondo está recubierto de pepinos de mar, bivalvos y erizos; no se hallan ocultos en recovecos y grietas, como uno esperaría en mar abierto. De inmediato, los pescadores empiezan a recolectar esos animales con las manos, igual que harían unos niños recogiendo huevos de Pascua.

Esa granja —si uno puede llamarla así— adopta un enfoque nuevo que reproduce, a gran escala, el funcionamiento de los sistemas naturales. Detrás de nosotros, ocupando toda la cala y también las adyacentes, hallamos un sinfín de cuerdas de las que cuelgan cestos donde crecen jóvenes vieiras; permanecerán ahí hasta que alcancen un tamaño lo bastante grande como para ser recolectadas por los hombres que nadan junto a mí. Aparte de ello, no hay otras jaulas o cercados. Tampoco se añaden fertilizantes, piensos artificiales o antibióticos.



«Empleamos un modelo denominado AMTI», explica Liang Jun, director científico de la empresa, «en el que los excrementos de una especie sirven de alimento a otras».

La acuicultura multitrófica integrada, o AMTI, es un concepto muy amplio que se ha desarrollado de modo distinto en países como Canadá, Escocia, Estados Unidos y Noruega. La idea es que, al cultivar juntas varias especies, unas reciclen los excrementos, o nutrientes, de las otras y así se reduzca la contaminación del agua. La forma más habitual de AMTI consiste en una serie de jaulas adyacentes en las que los ocupantes de cada una de ellas se alimentan de los nutrientes procedentes de las otras. El proyecto de AMTI más famoso, en la bahía de Fundy, en Canadá, emplea jaulas amarradas unas a otras para hacer circular a favor de la corriente los nutrientes desde los salmones hacia los bivalvos y las algas laminariales.

Sin embargo, Zhangzidao opta por una estrategia totalmente distinta. En esencia, Zhangzi y otras islas actúan como jaulas. El equipo de Jun ha estudiado con detalle los movimientos de los nutrientes a lo largo de la costa y en ciertas zonas ha construido arrecifes artificiales para redirigir las corrientes que los transportan. A continuación, ha sembrado los juveniles de vieira en las zonas ricas en nutrientes, al tiempo que ha eliminado con cuidado los depredadores.

De forma natural, las aguas se enriquecen en unas cuantas especies seleccionadas. La empresa monitoriza parámetros clave, como la temperatura, pero los animales dependen de sí mismos

para hallar alimento, hasta que los buceadores los recolectan de forma sistemática. No existen capturas accidentales de especies no deseadas, al contrario de lo que sucede con la pesca extractiva, y se genera muy poca contaminación. La empresa recicla las valvas para fabricar los bloques de los próximos arrecifes.

Lo que realmente marca la diferencia es la escala. «Cuando deciden cultivar una bahía, lo hacen de forma masiva, algo que sería imposible en los países occidentales», afirma Thierry Chopin, biólogo de la Universidad de New Brunswick que trabaja en el proyecto de la bahía de Fundy.

Las operaciones en esa bahía ocupan unas pocas hectáreas e incluyen nueve bateas con mejillones para filtrar el efluente. En cambio, el rancho oceánico de la isla de Zhangzi presenta cuatro veces la extensión de Chicago. La bahía de Fundy rinde anualmente unas 200 toneladas de algas laminarias y entre 300 y 400 toneladas de mejillones. Las islas en torno a Zhangzi producen 60.000 toneladas de algas laminarias, la mayoría como un subproducto que se vende localmente. Pero los beneficios proceden sobre todo de las 200 toneladas de erizos de mar, 300 toneladas de ostras, 700 toneladas de caracoles, 2000 toneladas de orejas de mar y la sorprendente cantidad de 50.000 toneladas de vieiras que se cultivan cada año. La operación es tan productiva que recientemente Zhangzidao ha puesto en marcha un negocio de pesca recreativa para aprovechar la gran cantidad de peces que entran en las calas para alimentarse de los florecientes invertebrados.



ACUICULTORES en el lago Lu alimentan a percas chinas, tras abandonar la cría de carpas debido a la polución que provocaban en el agua.

Jun afirma que ese tipo de acuicultura solo puede funcionar a gran escala. «Se necesita un sistema que cubra al menos 100 kilómetros cuadrados, la superficie de una pequeña ciudad, para que resulte económicamente viable. Y para ello debe investigarse en profundidad la dinámica del océano», comenta.

Hace girar la pantalla de su ordenador para mostrarme un mapa detallado de la isla con la distribución de los nutrientes y las zonas más productivas. La mayoría de esos factores dependen de las corrientes marinas, que Jun puede hacer variar dejando caer en el agua bloques de cemento del tamaño de un refrigerador para crear arrecifes artificiales. Ha depositado unos 20.000 de esos bloques en el mar.

Según algunos occidentales, Zhangzidao no aplica en realidad la AMTI, pues no cultiva peces, cuyos excrementos deberían, en teoría, alimentar a los invertebrados. De ahí que prefieran una expresión menos técnica, como «rancho marino». En cualquier caso, el ejemplo de Zhangzidao impresiona, tanto por su magnitud como por su eficiencia. Y, sin embargo, no es perfecto. Según un portavoz, más de la mitad de la zona tiene demasiada profundidad para poder pescar a mano, así que los pescadores recurren al arrastre; emplean pesadas redes rígidas con bocas de cinco metros de anchura que se arrastran sobre el fondo marino, a riesgo de dañarlo. Además, los productos de Zhangzidao poseen un elevado coste. Los pepinos de mar, pequeñas criaturas abolladas con aspecto de babosa y emparentadas con las estrellas de mar, se venden en China por unos 220 euros la pieza. Tal como sucede en Estados Unidos y en Europa, el marisco sostenible de China parece destinado sobre todo a los ricos.

INCLUIR A LOS CONSUMIDORES

De todos modos, la escala sin precedentes del proyecto señala una solución potencial para la enorme demanda china de pescado y marisco. El truco radica en producirlos de forma sostenible para todos los bolsillos. Pero comercializar productos ecológicos representa un reto en China, al menos por el momento, admite Yuming Feng, presidente de Zhangzidao. El consumidor tiene la última palabra, sostiene, y sin duda se preguntará por qué debería decantarse por ellos.

Por ahora, la población no muestra interés por el entorno o no desea pagar más para protegerlo, porque tiene otra preocupación mucho mayor. El Gobierno y los consumidores chinos anhelan productos fiables desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, afirma An Yan, de la oficina para Asia-Pacífico del Consejo de Custodia Marina.

Las alertas sanitarias sobre la intoxicación por plomo y la leche contaminada con melamina han provocado inquietud entre los consumidores chinos acerca del origen de los alimentos. Pero Yan opina que los cambios en la producción dirigidos a mejorar la seguridad alimentaria abren la puerta a la conservación. Cuando Zhangzidao empezó su experimento, exportaba la mayor parte de sus vieiras a consumidores estadounidenses, australianos y europeos preocupados por el ambiente. Hoy, todo su marisco permanece en China, publicitado como limpio y saludable, no como respetuoso con el entorno.

Ese discurso se repite en un mercado próximo a Dalian, donde las expectativas sobre los productos resultan obvias. Recorro los pasillos con tiendas repletas de pepinos de mar, cangrejos, vieiras y otros moluscos, sacudido por los gritos en chino preguntándome: «¿Qué busca?». Las almejas vivas salpican de agua mis pantalones, mientras mujeres mayores manipulan langostinos bajo carteles chillones con dibujos de peces sonrientes.

Casi todos los puestos del mercado proclaman que su marisco procede de la granja de Zhangzi, lo cual resulta poco probable, porque Zhangzidao vende la mayor parte de su producción a grandes mayoristas y a restaurantes. Pero la marca Zhangzi es muy apreciada. «Tienen arrecifes artificiales y eso es muy saludable para el pescado», sostiene Meng Ni Ou Yang, propietario de un puesto donde vende productos «de las islas» por un

sobreprecio del 20 por ciento. Otro vendedor, Hong Zhe Liang, simplemente dice: «Allí, el agua está más limpia».

Ninguno de los pescaderos expresa preocupación por el entorno y, cuando les pregunto acerca de ello, comentan que la conservación de la naturaleza no importa mucho a sus clientes. Aun así, otras regiones también experimentan con la AMTI. A lo largo de las costas próximas a Dalian y aún más al sur, en la bahía de Sanggou, existen extensas granjas de algas laminariales que incorporan elementos de esta técnica a escalas también enormes, aunque con mucha menor diversidad de vida marina. Para cubrir las demandas de una China hambrienta, los acuicultores marinos deberían llevar este modelo mucho más lejos.

LAGOS Y ESTANQUES MÁS LIMPIOS

Los cientos de miles de embarcaciones chinas dedicadas a la pesca tal vez dominen el mercado global, pero todas esas capturas resultan insuficientes para satisfacer la demanda interna. Más del 70 por ciento del pescado del país procede de sus ríos y lagos. No obstante, las recientes alertas sobre la contaminación de las aguas dulces han alimentado la inquietud sobre la seguridad del pescado consumido hasta ahora. Por consiguiente, cualquier intento de reducir el impacto de China sobre el mar debe restituir al mismo tiempo la fe en sus piscifactorías continentales. Una red de científicos repartidos por todas las regiones productoras de pescado del país persiguen ese objetivo.

La importancia de la acuicultura en la cuenca del río Yangtsé resulta obvia nada más aterrizar en Wuhan, 500 kilómetros aguas arriba de Shanghái. Nos hallamos en el centro de la principal región productora de pescado del mayor país piscícola del mundo. Alrededor del aeropuerto, bajo los puentes de la autopista y a lo largo de las carreteras, tan lejos como alcanza la vista, cada centímetro cuadrado de tierra disponible ha sido excavado e inundado para criar peces.

«Mira a la izquierda», dice Shouqi Xie, investigador de la Academia China de las Ciencias, cuando pasamos junto a interminables hileras de estanques. «Este es el motivo por el que llamamos “tierra de los mil lagos” a la provincia de Hubei.»

Unos 18.400 kilómetros cuadrados del país están cubiertos de estanques para la cría de peces. Aunque resulte difícil de imaginar, los expertos chinos afirman que un quinto de la proteína animal consumida en el mundo procede de peces de agua dulce, la mitad de los cuales se crían en China, a lo largo del Yangtsé.

Pero, en la actualidad, los titulares sobre la persistente contaminación del agua y los alimentos han mermado la confianza de los consumidores en los productos tradicionales de la acuicultura de estanque, como las carpas y los peces gato. «Esto es ridículo», afirma Xie. «Monitorizamos los peces a lo largo de toda su vida. En cambio, nadie sabe dónde nadan los peces silvestres o si han sido expuestos a la contaminación.»

De todos modos, las granjas tradicionales de agua dulce no resultan muy sostenibles. La acuicultura china se inició en el siglo v de nuestra era con Fan Li, filósofo, táctico y consejero del poderoso rey Goujian de Yue. Tras sus éxitos militares, Fan Li se retiró a la ciudad lacustre de Wuxi, donde escribió el primer manual del mundo sobre acuicultura. Este folleto de 400 caracteres de extensión incluye detalles como el número de carpas que deben estabularse al inicio del cultivo, la mejor temporada de crecimiento y la recomendación de cultivar tortugas para mantener alejado al «dragón de las inundaciones».

Las antiguas técnicas funcionaron bien durante un milenio, con pequeños estanques de aguas limpias y peces sanos al lado de las granjas terrestres. Sin embargo, en la década de los ochenta del siglo xx la industria se orientó hacia extensos estanques. Este cambio, así como el notable desarrollo de otras actividades, provocó una fuerte contaminación. El deterioro culminó en 2007 con una fatídica proliferación de fitoplancton en el lago Tai, o Tai Hu (*hu* significa «lago»), el hogar legendario de Fan Li. «Como la mayor parte del agua corriente de Wuxi procede de allí, la población no pudo beber de sus grifos. El agua era negra», afirma Xie. «Si uno se duchaba, olía realmente mal.»

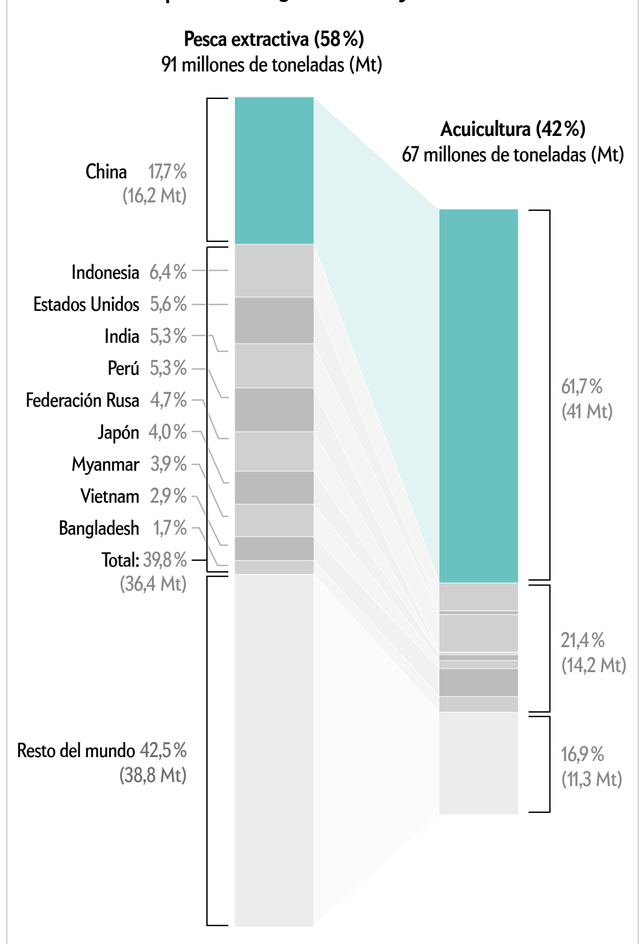
La marea negra de 2007 fue una señal de alarma para China. La gente no podía seguir confiando en el agua que bebía o en

CLASIFICACIÓN

El principal productor de pescado

China es, de lejos, el mayor suministrador mundial de peces, crustáceos y moluscos, capturados tanto en el mar como en lagos y ríos. De acuerdo con los datos más recientes, en 2012 produjo el 17,7 % de la pesca extractiva mundial (*columna izquierda*), casi tres veces más que el siguiente país.
Y lo que resulta aún más impresionante, cultivó el 61,7 % del pescado de agua dulce y agua marina del mundo (*columna derecha*). Si la pesca extractiva, ahora en retroceso, ha de sobrevivir, las naciones han de aprender a cultivar más pescado. China está mostrando el camino para lograrlo.

Producción de pescado en aguas marinas y continentales (2012)



FUENTE: *ANUARIO FAO: ESTADÍSTICAS DE PESCA Y ACUICULTURA, 2012.* ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, 2014; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfico*)



UN EQUIPO FORMADO POR MARIDO Y MUJER fertiliza el estanque que gestionan cerca de Wahan. Los científicos intentan ayudar a miles de familias a manejar sus estanques de forma más sostenible, algo vital para satisfacer la incesante demanda china de pescado.

el pescado que consumía. Y aunque las granjas piscícolas no habían sido las principales responsables de la proliferación de fitoplancton, la situación incentivó a los acuicultores chinos a buscar modos de compatibilizar una elevada productividad con la conservación del ambiente. Gente como Xie trabaja para mantener el agua limpia y, al mismo tiempo, incrementar el rendimiento.

EQUILIBRIO

Todos los ecosistemas acuáticos se enfrentan a un frágil equilibrio entre el exceso y la escasez de nutrientes. Los Grandes Lagos, por ejemplo, poseen especies invasoras que los consumen en abundancia, por lo que dejan el agua clara y muy oxigenada, pero poco productiva. En contra, el Yangtsé acumula demasiados nutrientes, como nitrógeno y fósforo, y poco oxígeno. El resultado es un agua verde y turbia habitada solo por unos seres que pueden prosperar en ambientes hipóxicos: las algas.

Durante siglos se mantuvo un equilibrio entre los nutrientes que entraban y salían de las piscifactorías de agua dulce. Pero en los últimos años la situación ha cambiado. La contaminación constituye una parte del problema, pero la propia acuicultura es otra. Las carpas, los peces más populares en China, se alimentan de todo, desde algas hasta aguas residuales, y producen residuos ricos en nitrógeno que sedimentan sobre el fondo. Estos nutrientes, junto con los fertilizantes añadidos a los estanques, son aprovechados por las algas, que, al crecer, limitan la cantidad de luz necesaria para las plantas que podrían aportar oxígeno. El ciclo continúa hasta que pocas especies pueden vivir en el lago, salvo las carpas y las algas. Durante una década de rápido desarrollo, la abundancia de algas en el lago Liangzi, en la provincia de Hubei, se multiplicó por 20 y la visibilidad en el lago se redujo a la mitad.

Lo compruebo por mí mismo subido a una pequeña lancha. El silencio del lago resulta inquietante y no puedo discernir si el manto que se extiende sobre nosotros corresponde a una nube baja o a esmog. El agua es verdosa y se halla en calma, como una gigantesca mancha de puré de guisantes aguado. Hace diez años, docenas de jaulas, todas repletas de carpas, se hacinaban a lo largo de la orilla y sus residuos aniquilaban a cualquier otra especie acuática. El Gobierno local pidió ayuda a la Universidad de Wahan para reestructurar la acuicultura en el lago, el segundo mayor de la provincia. Jiashou Liu, colega de Xie en la Academia China de las Ciencias, se percató de que la concentración de residuos estaba fomentando las proliferaciones de algas.

Hoy no hay cercados. Los acuicultores gestionan todo el lago como una enorme jaula y dejan que la naturaleza controle los peces. Tampoco existen carpas. Los acuicultores y los científicos se centraron en especies de mayor valor económico, como los cangrejos y las percas chinas, que contaminan menos, y, además, redujeron la cantidad de peces en el lago. Por último, sembraron plantas en las orillas, para devolver el oxígeno al agua.

Una vez al año, los granjeros acorralan a los peces en una esquina del lago y los despescan todos a la vez. Como en Dalian, no se necesita añadir fertilizantes o alimentos caros, que incrementan la carga de nutrientes. Y con más espacio para desplazarse, los animales no enferman. De forma sorprendente, un menor número de peces no afecta al rendimiento económico.

«Obtenemos mejores beneficios que cuando dependíamos de los estanques», comenta Fu Jun Deng, gestor de una de las dos empresas que explotan el lago. «El trabajo resulta fácil. Normalmente todo lo que tenemos que hacer es patrullar el lago y asegurarnos de que nadie roba nuestro pescado.»

Sin embargo, la menor cantidad de peces no logrará satisfacer la demanda creciente. Y el lago no permanece prístino; el agua es turbia y todavía hay muchas algas. Pero su calidad ha mejorado. La concentración de oxígeno asciende, la de nitrógeno disminuye, las plantas acuáticas proliferan en las orillas y la visibilidad aumenta lentamente.

Otros grandes lagos naturales de la región se están rehabilitando con proyectos similares. Pero estos quedan eclipsados por los millares de pequeños estanques, cada uno de ellos quizá del tamaño de un campo de fútbol, que dominan el paisaje. Tales explotaciones familiares producen una gran cantidad de alimento por hectárea y son las que de hecho sustentan el país. Mantener el agua limpia y los peces sanos en esas instalaciones constituye un reto. Por ello, además de los grandes proyectos, los científicos están innovando formas sencillas de cultivar un producto más saludable y sostenible.

Congxin Xie (no emparentado con Shouqi Xie) es profesor de la Universidad Agrícola de Huazhong y ha estado experimentando con las llamadas islas flotantes para depurar el agua. A primera hora de la mañana me lleva en coche hasta un estanque experimental situado en las proximidades de la pequeña ciudad de Gong'an. Esparcidos sobre el agua se hallan media docena de cuadrantes de plástico blanco en cuyo interior flotan batatillas acuáticas (*Ipomoea aquatica*). Parecen gigantescas jardineras flotantes. Xie ha dedicado varios años a estudiar cómo interactúan varias plantas acuáticas con el medio y finalmente se ha

fijado en esta especie por su rápido crecimiento y la capacidad de sus raíces para absorber enormes cantidades de nutrientes. Afirma que, con solo unos pocos planteles flotantes, la concentración de amonio se ha reducido en un tercio durante los últimos tres meses. (Un exceso de amonio mata a los peces.)

«La calidad del agua ha mejorado y es más clara», afirma Yung Chang Xu, uno de los acuicultores que operan los estanques. No hay «tantos peces muertos como el año pasado».

El hijo de Chang nos lleva en un bote de madera hasta los cercados y Xie toma un manojo de hojas de batatilla. Los cuadrantes de plástico, quizá del tamaño de una bañera, no están fondeados, sino que flotan libremente. Construirlos cuesta unos 130 euros, pero se recupera la inversión en solo un año si el granjero puede vender las batatillas como producto ecológico. En un restaurante cercano, un chef cocina al vapor sus hojas, les añade un aderezo salado y frutos secos y las sirve junto a varias especies de pescado de agua dulce. Aún no me he acostumbrado al sabor de la carpa, ni a sus minúsculas espinas, pero las batatillas resultan deliciosas y se terminan pronto.

La clave reside en la mezcla de los productos, afirma Xie. Las reformas han de beneficiar tanto al ambiente como a los acuicultores, por lo que los científicos deben trabajar junto con la población local. Los planteles flotantes de batatilla satisfacen ambos criterios y los granjeros comentan que piensan cubrir con ellos al menos el 5 por ciento de los estanques. Algunos se afanan por construir más a lo largo de las orillas.

Las plantas y los animales acuáticos se han convertido en el objetivo principal de China para lograr limpiar sus aguas. Tras la proliferación algal de 2007 en Wuxi, los científicos se esforzaron para que se incorporaran humedales a las explotaciones piscícolas. La Academia China de las Ciencias empezó a financiar numerosos proyectos a lo largo del Yangtsé en los que se empleaban caracoles acuáticos, lotos y docenas de otras especies de plantas y animales para luchar contra la contaminación.

Un ejemplo lo ofrece el lago Ge (Ge Hu), aguas arriba del lago Tai, que ha dejado de albergar jaulas con peces. Se halla cubierto por 2,6 kilómetros cuadrados de jacintos de agua cultivados para luchar contra la contaminación. En sus proximidades, la Granja Acuática Wu Jing, un extenso complejo de estanques industriales, dedica el 30 por ciento de sus láminas de agua a un filtro verde similar.

Los estanques cooperativos situados junto al lago Lu (Lu Hu) en Wuhan habían sido utilizados para cultivar carpas de forma muy contaminante. Con una producción intensiva de hasta 12.000 kilos de pescado anuales por hectárea, habrían reportado a los granjeros considerables ganancias si todo hubiera ido bien. Pero ello rara vez sucedió. A esa densidad, las enfermedades y la contaminación se hallaban fuera de control. En 2008, con la ayuda de la Academia China de las Ciencias, la granja incorporó humedales a su efluente, antes de su llegada al lago. Al mismo tiempo, los acuicultores sustituyeron las hacinadas carpas por percas chinas, que se cultivan a una densidad diez veces menor y de forma más sostenible y, además, alcanzan un mayor precio.

«Cada año es un experimento. Introducimos 50 o 100 individuos de una especie de pez y luego 100 de otra distinta», dice Hui Shang Xia, un granjero de 50 años de edad que ha trabajado aquí durante décadas. «Nunca he perdido dinero con un estanque, aunque a veces he ganado menos.»

Otras soluciones requieren más imaginación. Científicos del Instituto de Instrumental y Maquinaria Pesqueros, de la Academia China de Ciencias Pesqueras, en Shanghái, han desarrollado maquinaria para resolver un problema habitual en los estanques pequeños. En ellos las plantas que podrían absorber los nutrientes presentan una escasa actividad fotosintética. Esta se ve limitada por la baja disponibilidad de fósforo mientras brilla el sol, a pesar de que el nutriente abunda en el sedimento, afirma Hao Xu, director del instituto, mientras señala un enorme complejo de estanques experimentales de color guisante. Los ingenieros del centro han desarrollado una máquina alimentada por paneles solares que agita el sedimento en el fondo del estanque. Cuando luce el sol, libera fósforo para las plantas. Cuando el día se nubla, la máquina se detiene.

UN ÉXITO NECESARIO

La reciente explosión de bienestar económico en China ha fomentado un consumo de proteínas animales sin precedentes en la historia de la humanidad. Del mismo modo, se requieren enormes esfuerzos de conservación tanto en agua dulce como en el mar. La Academia China de las Ciencias está actuando sobre unas 30.000 hectáreas de estanques en toda la cuenca del río Yangtsé. Zhangzidao es una de las mayores granjas marinas de su tipo en el mundo y, junto a los cultivos de laminarias, empequeñecen cualquier otro proyecto de AMTI en el planeta.

El país toma prestadas ideas de Estados Unidos y de Europa, pero sería una ligereza pensar que la acuicultura allí se parece a la de los países occidentales. Estos prefieren peces de agua fría, como la trucha y el salmón, que requieren elevados niveles de oxígeno disuelto. China, en cambio, se inclina por especies de aguas pobres en oxígeno, como la carpa y el pez gato. Las ideas sobre la salud de los ecosistemas también son diferentes. «Lo que nosotros consideramos un lago contaminado, para la forma de pensar china es un eficiente productor de alimento», apunta Trond Storebakken, experto en pesquerías de la Universidad Noruega de Ciencias de la Vida, cerca de Oslo. «Pero un lago sobrecontaminado es un desastre. Me impresiona cómo se logra gestionarlo para que alcance el punto adecuado.»

Storebbaken cuenta con una amplia experiencia como consultor de la Academia China de Ciencias Pesqueras. Ha viajado por todo el país y ha quedado sorprendido por la capacidad de los científicos para reproducir los sistemas naturales mediante el empleo conjunto de depredadores, herbívoros y filtradores. Tiene fe en que China, tras miles de años de relación y adaptación con los productos de la pesca, esté iniciando un nuevo capítulo. «Es una forma de pensar totalmente diferente a la nuestra» en Occidente, afirma Storebakken. «Están dirigiendo el cambio. No a la perfección, en modo alguno, pero sí mucho mejor que nadie más.»

El reportaje y las fotografías de este artículo han sido financiados por una beca del programa Iniciativa de Reportajes Especiales de Mongabay (*mongabay.org*).

PARA SABER MÁS

Sustainable seafood and integrated fish farming in China. Vídeo en línea. Fondo Mundial para la Naturaleza, septiembre de 2012. **www.youtube.com/watch?v=18xyR8KWrgE#t=220**

Freshwater aquaculture in PR China: Trends and prospects. Qidong Wang et al. en *Reviews in Aquaculture*, octubre de 2014 (publicado en línea).

EN NUESTRO ARCHIVO

La revolución azul. Sarah Simpson en *IyC*, abril de 2011.

PESQUERÍAS

Pesca *y* consumo



De larga tradición en Asia, la explotación comercial de estos animales gelatinosos comienza a plantearse en otras regiones del planeta.

Agustín Schiariti, Hermes Mianzan y Verónica Fuentes

de medusas



UNA ACTIVIDAD ARTESANAL: Si bien puede alcanzar cotas industriales, la pesca de medusas se realiza mediante una flota y artes artesanales. Las redes de copos, como las que emplean estos pescadores mexicanos, son las que entrañan menos riesgo para los animales y su entorno.

Agustín Schiariti es investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina. En el marco del Proyecto Ecología Pesquera, del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), centra sus estudios en el ciclo biológico de las medusas y el desarrollo de sus pesquerías en Argentina.

Hermes Mianzan, investigador del CONICET experto en la dinámica de las agregaciones de zooplancton gelatinoso, fue el responsable del Proyecto Ecología Pesquera del INIDEP. Falleció en 2014, cuando este artículo comenzaba a tomar forma.

Verónica Fuentes es investigadora posdoctoral en el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona. Sus estudios se centran en la ecología del zooplancton gelatinoso, así como en las causas y consecuencias de sus proliferaciones.

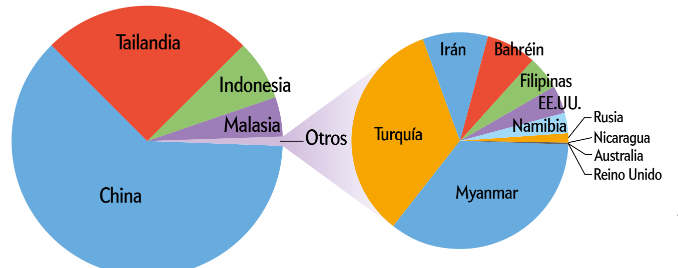
Debido a su capacidad urticante, las medusas suelen causar cierto rechazo en la población. En Latinoamérica se las conoce como aguas vivas, aguamalas o malaguas. En China y Japón, en cambio, son muy valoradas. Se las considera una delicia gastronómica digna de las ocasiones más especiales; en las celebraciones del año nuevo chino, bodas o cualquier otra fiesta con banquete, raramente falta una buena ensalada o sopa de medusas.

Los primeros registros de la utilización de estos animales gelatinosos para el consumo humano datan de entre los años 200 y 300 a.C. Pero la actividad comercial nació en fecha más reciente. En un comienzo, los chinos capturaban y procesaban las medusas para el consumo propio. Con el transcurso de los años, el consumo se incrementó. Lo que había comenzado como una actividad a escala familiar empezó a transformarse en la década de los años setenta del siglo xx en una industria pesquera que hoy en día mueve más de 70 millones de dólares anuales.

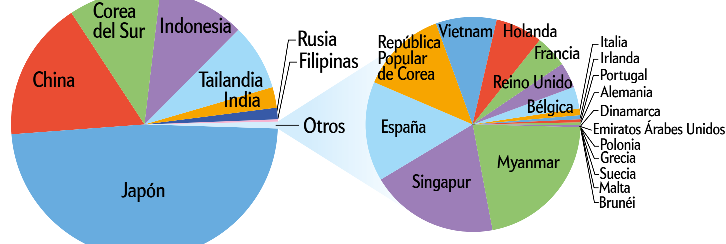
El desarrollo de esa industria puede dividirse en dos etapas. En la primera, la actividad comercial se expandió por los países orientales, sobre todo con la transformación de Japón, que pasó de ser un país productor y consumidor a ser principalmente consumidor e importador. Fueron ellos los que, junto con China, impulsaron el desarrollo de pesquerías comerciales de medusas en sus propias costas y en países como Tailandia, Malasia, Corea del Sur, Filipinas, Indonesia, Vietnam y Myanmar.

Al incremento sostenido del consumo en China y Japón durante las últimas tres décadas se le sumó la disminución de las capturas registradas en los mares asiáticos, tal vez debido a la sobrepesca. Surgió entonces la necesidad de buscar nuevas fuentes de obtención de medusas en otras regiones; ello dio lugar a una segunda etapa de expansión, que impulsó

Distribución geográfica de las capturas (porcentaje)



Distribución geográfica del comercio (importación + exportación)



JUANA LÓPEZ Y JAVIER ÁLVAREZ TELLO (*páginas anteriores*); FUENTE: «PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CAPTURA», COLECCIONES DE ESTADÍSTICAS DE PESCA, DEPARTAMENTO DE PESCA Y ACUICULTURA DE LA FAO (*gráficas de ambas páginas*)

EN SÍNTESIS

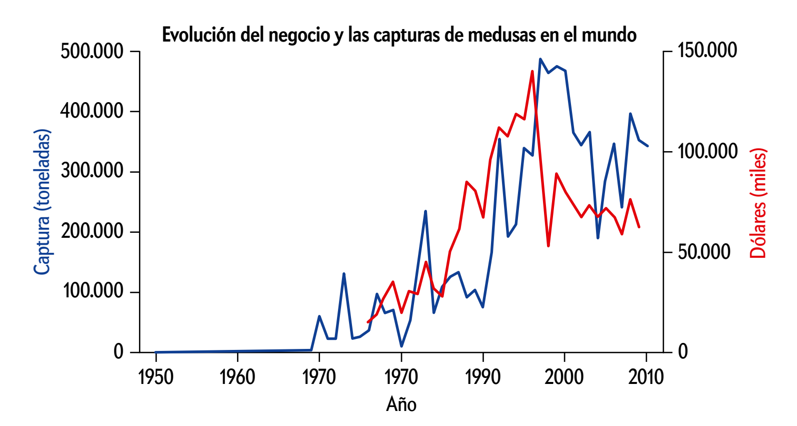
Ciertas especies de medusas son pescadas y explotadas comercialmente en varios países asiáticos, donde su consumo goza de una larga tradición. Se valoran por sus propiedades gastronómicas y nutricionales.

En Latinoamérica y España se está considerando la posibilidad de implantar esta pesquería. México, Honduras y Nicaragua ya han comenzado a desarrollarla. Argentina, Perú y España todavía están estudiando su rentabilidad.

La creciente demanda del mercado asiático podría impulsar la expansión de esta industria en todo el mundo. Sin embargo, antes deberá valorarse su viabilidad ecológica —no solo comercial—, y avanzar en la regulación del uso alimentario de estos animales.

esta actividad por primera vez fuera de Asia. Las pesquerías de medusas comenzaron a desarrollarse en Estados Unidos, México, Turquía, Irán, Namibia y Rusia, entre otros. En la actualidad, la producción en estos nuevos caladeros se exporta principalmente a Japón, China y Corea del Sur (solo una pequeña fracción se destina al consumo interno, dirigido a las comunidades asiáticas que habitan las grandes ciudades de estos países).

Según las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las capturas de medusas se mantienen por encima de las 200.000 toneladas anuales desde hace más de 30 años. A pesar de que los ingresos económicos que ello representa son inferiores a los derivados de la pesca de peces óseos y cefalópodos, las cifras no son para nada desdeñables. Esta actividad ha logrado posicionarse en el mercado mundial por encima de las capturas de recursos más tradicionales para nuestros paladares occidentales, como las vieiras y las langostas. Según un estudio publicado en 2000 por Michael J. Kingsford, de la Universidad de Sídney, en 1996 la captura de medusas alcanzó los dos tercios de las capturas mundiales de tiburones, rayas y quimeras en conjunto (504.000 frente a 760.000 toneladas). China es, sin duda, el país que más medusas pesca en el mundo: concentra más del 50 por ciento de las capturas mundiales, seguido de Tailandia, Indonesia y Malasia. El mayor importador es Japón: acapara cerca del 50 por ciento del sector.



LAS ARTES DE PESCA

Si bien la pesca de medusas puede alcanzar cotas industriales, la flota utilizada es siempre artesanal. La conforman embarcaciones pequeñas de entre 7 y 15 metros de eslora, que reducen los costos operativos.



TÉCNICAS

Artes de pesca

Para pescar medusas se utilizan varias técnicas, todas artesanales. Se recurre a una u otra según las características de la especie y las condiciones del medio.

Redes de cerco
Primero se concentran las medusas mediante una red de cerco; luego se recolectan manualmente, con redes de copo. Aunque facilita la recolección, se trata de una técnica poco eficiente si las medusas se hallan dispersas. Permite preservar la calidad de las medusas. El impacto sobre el ambiente puede ser notable, debido a la captura de especies no deseadas.

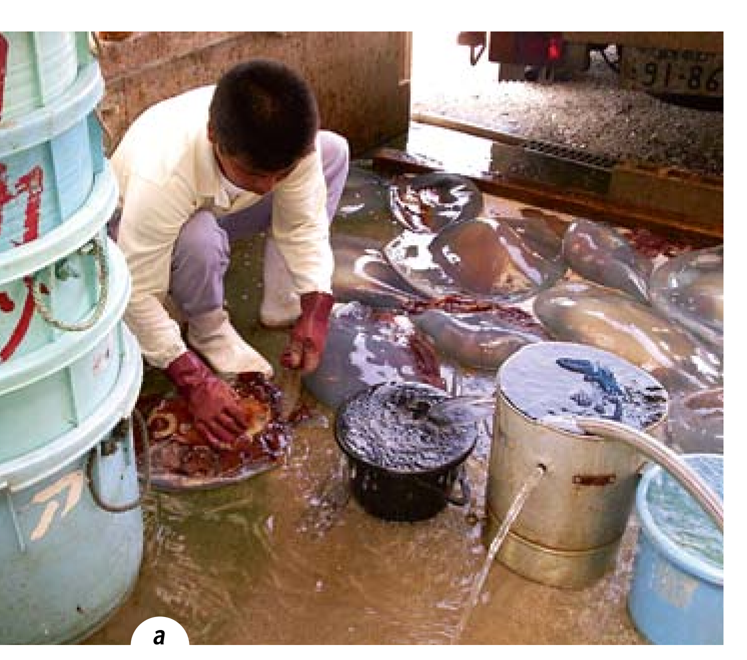
Redes de marea o enmalle
Se colocan paños de red perpendiculares al flujo de las mareas y se mantienen extendidos mediante boyas en el extremo superior y pesos en el inferior. Aumenta la eficiencia y reduce los costes operativos cuando las medusas están dispersas, ya que las redes actúan de forma pasiva. Pero cuando las mareas o las corrientes son intensas, las medusas pueden sufrir daños, con la consecuente pérdida de calidad en el producto. Los daños ambientales debido a la captura de especies no deseadas son importantes.

Redes de copo o cuchara
Las medusas se recolectan desde embarcaciones pequeñas y de forma manual; de una a una, o unas pocas a la vez. Esta técnica es útil cuando las medusas están cerca de la superficie y en grandes densidades, pero resulta ineficiente si se hallan dispersas. Si bien es laboriosa y lenta, la pesca de copo minimiza los daños generados a las medusas (por lo que maximiza la calidad del producto obtenido) y evita la captura incidental de especies no deseadas.



Redes de arrastre
Pueden ser de fondo (*a*) o de media agua (*b*). El arrastre de fondo es la técnica más eficiente cuando las medusas se hallan dispersas o cuando no se ven desde la superficie. Pero entraña costes mayores porque se requieren embarcaciones más potentes y equipadas para arrojar y recoger las redes. Con un menor esfuerzo se pueden capturar grandes cantidades de medusas, pero los daños sobre estas pueden ser importantes. También el impacto ambiental es notable, no solo por la captura de especies no deseadas sino por el daño causado a las comunidades abisales. El arrastre de media agua, en cambio, no causa daños sobre las comunidades abisales. Se usa un sistema u otro (de fondo o de media agua) según la distribución de las medusas en la columna de agua y las características de cada región.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (artes de pesca)





Se utilizan varias técnicas, según las características de cada especie (tamaño, abundancia) y del medio (profundidad, corrientes de marea, transparencia del agua). Destacan las redes manuales de copo o cuchara, redes de cerco, redes de marea o enmalle, y las redes de arrastre de fondo o de media agua que se usan para la mayoría de las especies de peces. Dado que no es muy común que los pescadores se dediquen exclusivamente a las medusas, el arte de pesca empleado depende sobre todo de las embarcaciones y artes de pesca de que dispongan.

Con excepción de las redes de copo y de enmalle, todas las demás técnicas presentan un riesgo de dañar las medusas capturadas o de capturar ejemplares fuera de los rangos de talla permitidos. Dado que son organismos delicados y que los daños sufridos durante la captura pueden incidir drásticamente en la calidad del producto, la elección del tipo de arte de pesca no es un tema menor. Asimismo, las redes de copo reducen el riesgo de pesca incidental y de daño al medio (a diferencia de las de arrastre). Aunque el método es laborioso, la recolección se ve facilitada por la presencia de medusas en agrupaciones densas. Además, en varios casos las redes de copo se utilizan junto con redes de cerco o trasmallos (primero se concentran las medusas y luego se capturan una a una con los copos).

También debe tenerse en cuenta el tamaño de malla. Para peces, se asume que el tamaño adecuado es aquel que permite que escapen los ejemplares juveniles y retiene a los que presentan la talla permitida. Pero en el caso de las medusas, las mallas de mayor luz tienden a dañarlas durante los arrastres, incluso si estos son breves. Las mallas más tupidas las dañan menos; sin embargo, además de capturar ejemplares juveniles, presentan mayores tasas de colmatación. Al acumularse, las medusas van tapando los poros de la red, que acaba convirtiéndose en un «saco» y perdiendo la capacidad de filtración. En este estado, la red puede romperse fácilmente y causar graves daños a la captura.

DEL MAR AL PLATO

A diferencia de los peces, moluscos o crustáceos, que pueden comercializarse simplemente conservados en hielo, las medusas deben ser procesadas inmediatamente después de la captura para evitar su rápida degradación. Por este motivo, suelen ser los propios pescadores los que se encargan de esta tarea. Ello aporta valor añadido al producto y, por tanto, una mayor rentabilidad.

Las técnicas de procesado varían en función de las especies capturadas, del artesano que realiza esta labor y de las exigencias del mercado. No obstante, todas ellas incluyen una primera fase de lavado exhaustivo con agua de mar; con ello se eliminan el mucus y las gónadas, evitando así la descomposición del material. Este paso resulta fundamental para la calidad del producto.

Tras el lavado comienza la deshidratación. Se desarrolla mediante etapas sucesivas, a través de las cuales las medusas van perdiendo agua por el efecto absorbente de una mezcla de sal común (NaCl) y alumbre ($KAl(SO_4)_2.12H_2O$). El alumbre actúa, además, como bactericida y favorece la obtención de una textura firme. Cada especie tiene sus requerimientos particulares en cuanto a las proporciones de sal y alumbre, y el tiempo que debe durar cada una de las etapas —detalles que suelen mantenerse en secreto—. Con este proceso las medusas pierden entre el 75 y el 95 por ciento del agua. El tratamiento completo de deshidratación requiere entre 1 y 40 días. El rendimiento obtenido varía entre el 5 y el 30 por ciento del peso húmedo, según la especie y el tipo de producto que se desee.

Los estándares de calidad que deben cumplir las medusas dependen de cinco parámetros: elasticidad, textura, color, tamaño y forma del producto semideshidratado. Las medusas procesadas deben quedar elásticas, es decir, deben resistir un suave estiramiento sin romperse y deben volver a su forma original. Al mismo tiempo, deben presentar una textura crujiente. Este equilibrio es, de lejos, la cualidad que mayor valor económico les confiere y la más difícil de lograr.

Antes de consumirse, las medusas deshidratadas deben rehidratarse en agua dulce a fin de eliminar el exceso de sal. Dado que el tiempo requerido para la rehidratación y el corte de todos y cada uno de los ingredientes para una ensalada de medusas puede resultar excesivo para ciertas personas, se han desarrollado productos listos para consumir con una gran variedad de sabores. Se venden en los supermercados en grandes cantidades e infinidad de variedades (con salsa de soja, wasabi, mostaza, huevos de pescado, etcétera). Dado que las medusas no tienen un sabor característico, suelen servirse como parte de otros platos más elaborados, donde adquieren el sabor de los otros ingredientes y condimentos.

Además de por su valor gastronómico, en Asia las medusas se aprecian también por sus propiedades curativas y nutricio-

HERMES MIANZAN Y AGUSTÍN SCHIARITI (*a, b, c y d*)





LISTAS PARA COMER: Inmediatamente después de pescarse, las medusas se lavan con abundante agua de mar (*a*) para eliminar residuos y luego se deshidratan con sales (*b*). Antes de consumirse, deberán rehidratarse con agua dulce. Pueden encontrarse en una gran variedad de formatos; la tercera fotografía (c) muestra unos lotes de campanas blancas de *Rhopilema hyspidum* (*izquierda*) y campanas de *Rhopilema esculentum* (*centro y derecha*) en un mercado en Kyushu (Japón). En muchos supermercados japoneses (*d*), pueden hallarse medusas listas para comer (*círculo*), rehidratadas y cortadas en juliana, por ejemplo .

nales. Según la medicina tradicional china, mejoran el sistema cardiovascular, equilibran la presión arterial, mejoran los niveles de colesterol y son beneficiosas para las articulaciones y la piel.

Las medusas frescas (vivas) contienen alrededor de un 95 por ciento de agua y entre un 4 y un 5 por ciento de proteínas, sobre todo colágeno. Su valor calórico es muy reducido (menos de 20 kilocalorías para una ración de 100 gramos), casi no contienen grasas y la proporción de hidratos de carbono nunca supera el nivel de trazas. Durante el deshidratado pierden entre un 75 y 95 por ciento de agua.

Se piensa que el colágeno, principal componente de las medusas después del agua, es el agente responsable de las propiedades medicinales, dado que es el compuesto esencial del tejido muscular, cartílago y huesos. Se ha estimado que el 46,4 por ciento del peso seco liofilizado de la medusa *Stomolophus meleagris* corresponde a colágeno. Asimismo, en un experimento con ratas publicado en 2001 por Y-H. Peggy Hsieh, de la Universidad de Auburn, y sus colaboradores, se demostró que el tratamiento con colágeno extraído de medusas resultaba eficaz para combatir la artritis reumatoide.

En España, algunos restaurantes famosos, como los barceloneses Moments y Dos Palillos, el maresmenco Santa Pau o el madrileño La Sopa Boba, incluyen en su carta platos con medusas. Han intentado utilizar las especies más comunes del Mediterráneo, pero no han podido, ya que la Comisión Europea no aprueba su uso alimentario. Así que han optado por importar y cocinar las especies que ya se comercializan en Asia.

LAS MÁS VALORADAS

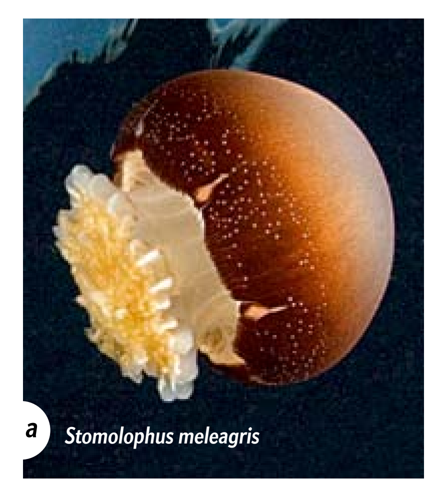
Casi todas las medusas que se comercializan actualmente pertenecen al orden Rhizostomeae (filo Cnidaria, clase Scyphozoa). Sus características organolépticas (sabor, textura y color) y su gran tamaño (entre 10 y 100 centímetros), que facilita la captura, explican esta preferencia. Además de las Rhopilemas, entre estas especies podemos mencionar a la medusa bala de cañón (*Stomolophus meleagris*), blanco de pesquerías en Estados Unidos y México, o a la medusa azul (*Catostylus mosaicus*), explotada comercialmente en Australia e Indonesia. No es casual que el consumo de medusas surgiera en la región indo-pacífica, ya que es allí donde medran más especies de este grupo. Hoy en día son 18 las especies que se comercializan.

Aunque de menor valor económico, se pescan también medusas de otros órdenes (*Cyanea nozakii*, *Chrysaora melanaster* o *Aurelia aurita*, del orden Semaeostomeae); se comercializan durante períodos en los cuales disminuyen las capturas de las especies más preciadas o se utilizan para otros fines, como ingrediente proteico para la elaboración de alimentos para mascotas. Aunque se paga poco por ellas, las enormes densidades que alcanzan y la relativa facilidad para pescarlas y procesarlas hacen que esta actividad sea rentable. Se pescan incluso especies que producen picaduras mortales; es el caso de las cubomedusas (clase Cubozoa), que son consumidas por poblaciones aborígenes en Taiwán.

EL IMPACTO ECOLÓGICO

Las medusas constituyen una pieza clave de las comunidades marinas. Son depredadores voraces de plancton y al mismo tiempo forman parte de la dieta de varias especies de peces, tortugas y aves. Cumplen un rol de suma importancia en la regulación del ciclo de nutrientes, transfiriéndolos desde la superficie al fondo de los océanos, y en los ciclos biogeoquímicos. Al finalizar su temporada, a finales de otoño o principios de invierno, las medusas mueren y caen al fondo; allí se descomponen y todo el alimento y energía que extrajeron de la columna de agua (el plancton del cual se alimentan ha consumido algas, las cuales previamente capturaron nutrientes y luz, transformando esa energía en carbono) pasa en forma de carbono a las comunidades bentónicas. Asimismo, proveen hábitat para peces juveniles y algunos crustáceos. Por tanto, un crecimiento descontrolado de la pesca comercial de medusas podría entrañar graves consecuencias para los ecosistemas marinos.

Dada la importancia ecológica de estos organismos, deberían llevarse a cabo estudios sobre el impacto ecológico que tendría


a *Stomolophus meleagris*


b *Lychnorhiza lucerna*


c *Cotylorhiza tuberculata*


d *Rhizostoma pulmo*

ESPECIES DE MEDUSAS que se explotan comercialmente en México (*a*) y Japón (*b*) y con potencial para convertirse en recursos pesqueros en Argentina (*c*) y España (*c*, *d*).

NOAA (*a*); SHIN-ICHI UYE (*b*); VLADOMIR ONOFRI (*c*); THINKSTOCK/PLANCTONVIDEO (*d*)

el desarrollo de su pesquería, sobre todo en mares tan esquilmados como el Mediterráneo. Sin embargo, estas investigaciones todavía no se han realizado.

La mayoría de las pesquerías de peces, crustáceos o moluscos se administran mediante un sistema de cuotas, o cupos, de captura en donde se establecen las cantidades que pueden ser capturadas por la flota comercial cada año. Este sistema requiere el conocimiento de la abundancia (o biomasa) de cada uno de los recursos que se quiere administrar. En las pesquerías de medusas, la estimación del tamaño de las poblaciones que podrían explotarse comercialmente resulta tremendamente compleja. Ello se debe a las particularidades del ciclo biológico de este animal.

Las medusas son organismos de vida relativamente corta (a menudo menos de un año), crecen con mucha rapidez (hasta varios milímetros por día) y, por consiguiente, son capaces de aumentar su biomasa en poco tiempo. Además, las especies con valor comercial suelen presentar un ciclo biológico alternante, o metagenético: el organismo en fase de medusa (el blanco de las pesquerías), de vida libre y nadadora, produce y libera al agua gametos; una vez fecundados, estos forman un huevo, que da lugar a una larva denominada plánula; esta nada hacia el fondo del mar hasta encontrar un sustrato preferentemente duro en el cual se fija, dando lugar a un pequeño pólipo de vida sésil que presenta el aspecto de una pequeña anémona; el pólipo se reproduce asexualmente formando nuevos pólipos, que, bajo ciertas condiciones ambientales (determinadas sobre todo por la temperatura y la concentración de alimento), comienzan un proceso de estrobilación, mediante el cual forman pequeñas medusas juveniles, o éfiras, que son liberadas al agua; las éfiras crecen entonces en la columna de agua y alcanzan la madurez sexual para convertirse en medusas adultas, cerrando así el ciclo [*véase* «La metamorfosis de una medusa», por Uxue Tilves, Verónica Fuentes y Dacha Atienza; Investigación y Ciencia, diciembre de 2008].

La abundancia de medusas depende del éxito de cada una de las etapas de ese complejo ciclo biológico. De aquí que sea tan difícil establecer si un *stock* de medusas se encuentra sobreexplotado. Sí sabemos, en cambio, que se trata de un recurso anual con pautas de manejo que podrían asemejarse a las aplicadas para calamares o langostinos. En estos casos, al inicio de cada temporada se estiman las abundancias del recurso y se establece qué porcentaje de la población podrá ser capturado ese año a partir de diversos parámetros biológicos y ambientales. Luego se monitorean las capturas y, al llegar al valor máximo correspondiente a esa temporada, se recomienda el cierre de la misma. Salvo excepciones, las pesquerías de medusas aún no están reguladas. No obstante, dado que su explotación comercial se está intensificando y diversificando, sería recomendable que estas cuestiones comiencen a discutirse cuanto antes entre expertos, pescadores, empresarios y administradores.

Para llevar a cabo una correcta gestión de la pesquería de medusas, deberían identificarse los períodos y las áreas donde las poblaciones de medusas son más abundantes y de mayor talla, conocer la talla de madurez sexual de las especies explotadas y localizar los bancos de pólipos. En la actualidad, en el marco del proyecto Europeo Med-Jellyrisk (www.jellyrisk.eu), se están desarrollando una serie de modelos que, teniendo en cuenta la temperatura del agua, la concentración de nutrientes

y la dirección y velocidad de los vientos, intentan predecir la probabilidad de que se produzcan grandes bancos de medusas en las costas. En este proyecto participa uno de los autores de este artículo (Fuentes), junto con Antonio Canepa y Josep-Maria Gili, del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC en Barcelona. Si se demuestra su eficacia, estos modelos podrían utilizarse como una herramienta más de gestión.

Además de todos esos conocimientos biológicos, también sería necesario contar con buenas estadísticas de capturas y comercio. Actualmente no se sabe con precisión cuántas medusas se capturan anualmente en el mundo. Las estadísticas de la FAO se hallan subestimadas, ya que algunos países no reportan sus capturas o ni siquiera las registran. Según la información aportada por las aduanas de Japón, el peso de las medusas importadas desde ciertos países es mayor que el que figura en las estadísticas de capturas de la FAO.

La identificación taxonómica de las especies explotadas es también otro de los problemas que dificultan la gestión de esta pesquería. En los registros de la FAO, todas las capturas de medusas figuran como «*Rhopilema* sp» o, directamente, como «medusas». Si bien es cierto que *Rhopilema esculentum y R. hispidum* son las más cotizadas, existen más de una docena de especies que se comercializan en diferentes regiones.

VIABILIDAD COMERCIAL EN IBEROAMÉRICA

En Latinoamérica y España, la pesca de medusas es una actividad prácticamente desconocida. Más aún, nuestra experiencia indica que la primera reacción de la gran mayoría de las personas consultadas (pescadores, biólogos pesqueros, funcionarios públicos y turistas) es de sorpresa y de escepticismo al enterarse de que estos animales pueden pescarse, que pueden tener valor económico y, sobre todo, que son comestibles.

Con todo, el creciente interés de empresarios asiáticos que estarían dispuestos a invertir en el desarrollo de esta industria comienza paulatinamente a cambiar la visión de algunos sectores (administradores y pescadores). Cada vez son más numerosas las consultas que recibimos en Argentina, España, Ecuador, Colombia y Perú.

México es sin duda el país que ha alcanzado el mayor grado de desarrollo de este negocio: pesca y exporta a Asia unas 9000 toneladas de medusas al año. *Stomolophus meleagris*, la medusa más pescada y procesada en este país, alcanza la máxima calidad (Grado A) según los estándares del mercado japonés; se encuentra entre las más valoradas después de las medusas asiáticas *R. esculentum* y *R. hyspidum*. Nicaragua y Honduras también pescan y exportan la misma especie, con volúmenes inferiores (menos de 500 toneladas).

La pesca comercial de medusas se está expandiendo y diversificando. Los países consumidores están buscando nuevos caladeros alrededor del mundo, por lo que se están empezando a desarrollar pesquerías en países en los que esta práctica resulta toda una novedad y donde no existen todavía los conocimientos necesarios para pescar, procesar y administrar correctamente estos animales. Sin embargo, a excepción de México, en el resto de países todavía resta demostrar la viabilidad comercial de esta actividad.

En la costa norte de Argentina, *Lychnorhiza lucerna* es muy abundante. Alcanza tallas notables (hasta 50 centímetros) y presenta una proporción de agua y proteínas similar a las especies comestibles. Mediante una adaptación de las técnicas de procesamiento utilizadas en Japón y Estados Unidos hemos obtenido un producto similar a los que se consumen en Asia. Los resultados obtenidos hasta el momento sugieren que la pesquería de medusas sería factible en ese país y constituiría un buen complemento para los pescadores artesanales de la región.

En España, las especies *Rhizostoma pulmo* y *Cotylorhiza tuberculata* son muy abundantes durante el verano, sobre todo desde finales de julio hasta finales de octubre [*véase* «¿Por qué proliferan las medusas?», por Luis Cardona; Investigación y Ciencia, junio de 2014]. También alcanzan tamaños considerables (hasta 30 centímetros de diámetro) y presentan características similares a las especies mencionadas anteriormente. La explotación de estas especies ha de tratarse y plantearse con sumo cuidado, ya que a ellas se encuentran asociados numerosos peces que las utilizan de refugio y también para obtener alimento. En la actualidad, en determinadas zonas de la costa española estas medusas se capturan mediante embarcaciones de pesca para disminuir su presencia en zonas turísticas donde, a pesar de ser poco urticantes, ejercen un impacto negativo sobre las actividades de ocio.

Debido a la reducción de las poblaciones *R. esculentum*, la especie más valiosa del mercado, en China se ha estado pescando y procesando *Cyanea nozakii*, de calidad inferior. Este hecho, sumado al constante aumento en la demanda de medusas, nos lleva a pensar que esta pesquería podría ser viable económicamente en varios países de nuestra región.

En la medida que el consumo de medusas en Asia siga intensificándose, la expansión y diversificación de las pesquerías de medusas parece inevitable. Por tanto, es muy factible que en un futuro muy próximo podamos incluir a las medusas entre los recursos pesqueros de nuestros países, constituyéndose en una alternativa muy bien recibida sobre todo durante estos tiempos de crisis. Y quién sabe si algún día la carta de su restaurante habitual ofrecerá platos como *ensalada de medusas* o *pincho de medusas rebozadas*.

Artículo publicado en memoria de Hermes Mianzan, fallecido en 2014. Fue uno de los más destacados biólogos marinos de América del Sur y mentor de numerosos investigadores como Agustín Schiariti, que siempre le estará agradecido por el apoyo y los conocimientos transmitidos.

PARA SABER MÁS

Jellyfish as food. H-Y. Peggy Hsieh et al. en *Hydrobiologia*, vol. 451, págs. 11-17, 2001.

¿Un mar de gelatina? H. Mianzan et al. en *Ciencia Hoy*, vol. 15, núm. 86, págs. 48-55, 2005.

Historia de vida y dinámica de poblaciones de *Lychnorhiza lucerna* (Scyphozoa) ¿Un recurso pesquero alternativo? A. Schiariti. Universidad de Buenos Aires, 2008.

La medusa *Lychnorhiza lucerna* (Cnidaria: Scyphozoa) como recurso pesquero alternativo en Argentina. A. Schiariti y H. Mianzan en *Informes Técnicos INIDEP*, vol. 42, págs. 1-9, 2013.

The jellyfish fishery in Mexico. Juana López Martínez y Javier Álvarez Tello en *Agricultural Sciences,* vol. 4, págs. 57-61, junio de 2013.

Jellyfish fisheries: FAO catch statistics and known unknowns. Lucas Brotz y Daniel Pauly en *Fourth International Jellyfish Blooms Symposium Proceedings*, Hiroshima, dirigido por Shin-ichi Uye, pág. 57, junio de 2013.

Environmental effects on cephalopod population dynamics: Implications for managements of fisheries. Paul G. K. Rodhouse et al. en *Advances in Marine Biology*, vol. 67, págs. 99-233, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Medusas en el plato. Pere Castells en *IyC*, septiembre de 2014.

CIBERSEGURIDAD

SOBREVIVIR EN LA CIBERG

Primera regla: deja de pensar que otros te van a proteger

Keren Elazari

Quienes se dedican a la seguridad informática suelen decir que hay dos tipos de compañías: las que saben que han sido atacadas y las que aún no saben que han sido atacadas. Los titulares de los últimos años demuestran que esta broma se acerca bastante a la realidad. Los cibercriminales han robado los números de las tarjetas de crédito de varias compañías, incluidas Target, Home Depot y JGMorgan Chase. Expertos en seguridad informática han descubierto fallos en algunos de los pilares de Internet, como la reciente vulnerabilidad Heartbleed en la biblioteca criptográfica OpenSSL. Un ataque masivo a Sony Pictures Entertainment destruyó tantos datos que los mandó de vuelta a la época del papel y el lápiz. Los datos de más de 80 millones de usuarios de la compañía de sanidad privada Anthem fueron robados. Y estos son solo los incidentes que conocemos.

En los próximos años vamos a ver un crecimiento de los ciberataques, lo cual representa un problema para toda la población. Ahora que todos estamos de una forma u otra conectados al ciberespacio (a través de teléfonos, ordenadores y redes corporativas), somos vulnerables. Redes, servidores, ordenadores personales o cuentas en línea son un recurso básico para que los cibercriminales y Gobiernos husmeen. Una red corporativa u ordenador personal puede fácilmente convertirse en una herramienta más en el arsenal de los cibercriminales —o de los ciberespías pagados con dinero público—. Ordenadores vulnerables pueden convertirse en el origen del próximo ataque o en parte de una red de dispositivos en estado latente esperando a ser utilizados para lanzar un ataque de denegación de servicio o distribuir correo basura.

La respuesta habitual de los Gobiernos ante esas amenazas ha sido militarizar el ciberespacio, intentando someter el mundo digital a un control central. Pero esta estrategia está condenada al fracaso; de hecho, puede empeorar las cosas. La ciberseguridad guarda semejanza con un problema de salud

EN SÍNTESIS

Los ciberataques van a ser cada vez más frecuentes, y no solo las grandes compañías o los Gobiernos son posibles objetivos: cada uno de nosotros, usuario de la tecnología moderna, también lo es.

En riesgo están no solo datos abstractos o «secretos». La ciberseguridad hoy versa también sobre la protección de cosas e infraestructuras, la tecnología de la que depende nuestra forma de vida.

Los Gobiernos y compañías de tecnología no pueden encargarse ellos solos de la seguridad en el ciberespacio. Hace falta un sistema inmunitario distribuido que cuente con los *hackers* para hacer el trabajo.

Los individuos también tenemos un papel. Cada persona conectada a la Red tiene que poner su grano de arena en hacer el sistema inmunitario más fuerte, practicando el equivalente cibernético a la higiene personal.



Keren Elazari, experta en seguridad informática, ha trabajado para distintos Gobiernos, empresas de seguridad y compañías.

UERRA

pública. Las agencias gubernamentales como los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de EE.UU. desempeñan un papel fundamental a la hora de parar una epidemia, pero su trabajo resulta inútil sin la colaboración de los ciudadanos.

EL VASTO CIBERESPACIO

Parte del reto de proteger el ciberespacio reside en que no existe un único ciberespacio. Se trata de una vasta red de sistemas conectados a otros sistemas, que cambian y crecen continuamente. Para apreciar mejor esta propiedad debemos retroceder medio siglo y repasar los trabajos de Norbert Wiener, profesor de matemáticas del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 1948, Wiener tomó prestado del griego clásico un término para denominar la nueva disciplina que estaba creando, la cibernética, que definió como el estudio del control y la comunicación en los animales y las máquinas. En griego se llamaba *kybernētēs* al timonero o capitán de las embarcaciones que navegaban en el Mediterráneo. Por analogía, debemos entender por ciberespacio el conjunto de técnicas electrónicas y digitales que resultan fundamentales para la vida moderna. El ciberespacio está compuesto por un conjunto muy diverso de técnicas de control remoto y comunicaciones: desde los dispositivos integrados que suministran insulina por radiocontrol a los satélites GPS.

El ciberespacio no es un espacio público; no es como la Luna o las aguas internacionales. Tampoco se trata de un conjunto de territorios que los Gobiernos o militares puedan controlar —incluso si se lo llegásemos a pedir—. La mayoría de las técnicas y redes que forman el ciberespacio están en manos de y son mantenidas por conglomerados de multinacionales con ánimo de lucro.

El número y variedad de las técnicas que forman este ciberespacio crece de forma espectacular. La compañía de tecnología de redes Cisco Systems pronostica que para el año 2020 habrá 50.000 millones de dispositivos conectados a Internet, de los cuales una gran parte será de tipo industrial, militar o aeroespacial. Cada dispositivo conectado al ciberespacio constituye un objetivo potencial, y los ciberatacantes son muy buenos descubriendo los enlaces más vulnerables. El *hacker* que entró en los terminales de venta de Target y robó los datos de millones de pagos con tarjeta de crédito consiguió el acceso entrando primero en un sistema mucho más desprotegido: Fazio Mechanical Systems, la compañía encargada del mantenimiento de los sistemas de calefacción de Target. Los espías chinos que supuestamente entraron en la red de la compañía de defensa Lockheed Martin en 2011 lo hicieron a través de la empresa de seguridad RSA, que proveía a Lockheed de los identificadores de acceso. RSA fue atacada con éxito debido a que un empleado de la filial EMC abrió un fichero de Excel, aparentemente inocuo, adjunto en un correo electrónico.

Los dispositivos de los que está hecho Internet no son simples ventanas a las que los atacantes se pueden asomar, sino potenciales objetivos de sabotaje. En el año 2008, los analistas de

seguridad demostraron que podían obtener acceso remoto a los marcapasos. Desde ese día, los *hackers* han mostrado que pueden interceptarse las comunicaciones con los implantes de insulina y alterar las dosis, con posibles consecuencias fatales para los pacientes.

Las infraestructuras físicas también se hallan en riesgo de ataque, tal y como vimos en 2010 cuando el virus informático Stuxnet destruyó las centrifugadoras de la planta de enriquecimiento de uranio en Natanz, Irán. Stuxnet, supuestamente fruto de una costosa colaboración entre los Gobiernos de EE.UU. e Israel, marcó un momento histórico: el código informático podía alterar el comportamiento y destruir sistemas físicos. Desde entonces, otros ataques han confirmado que esta posibilidad es real. El pasado mes de diciembre, la Oficina Federal Alemana de Delitos Informáticos informó de que unos *hackers* habían alterado el comportamiento de una acería impidiendo que se apagara, lo que provocó daños masivos en el sistema. Tres meses antes, un grupo de *hackers* de China atacó los sitios web de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano estadounidense que procesan los datos que más tarde se usan en aviación, respuesta a desastres naturales y otras labores críticas.

Los ejemplos anteriores nos muestran que la ciberseguridad no atañe solo a nuestros ordenadores, servidores o redes. Tampoco se trata de guardar secretos —como si Google y Facebook no lo supieran ya todo sobre nosotros—. La batalla real del ciberespacio versa sobre la protección de cosas físicas: infraestructuras y procesos. Los peligros son el sabotaje y la subversión de las tecnologías de las que dependemos todos los días: coches, cajeros automáticos, servicios médicos, redes eléctricas, satélites de comunicaciones, redes telefónicas, etcétera. La ciberseguridad es esencial para proteger nuestro modo de vida.



JUSTIN RENTERIA

EL PAPEL DEL GOBIERNO

Los Gobiernos se enfrentan a un serio dilema a la hora de proteger el ciberespacio. Numerosas agencias federales, incluido el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, tienen un interés legítimo en proteger las compañías estadounidenses y a sus ciudadanos de un ciberataque. Pero otras entidades pueden beneficiarse de las vulnerabilidades en redes y comunicaciones. Grupos secretos como la Agencia de Seguridad Nacional (NSA, por sus siglas en inglés) invierten millones de dólares en encontrar fallos técnicos que podrían permitir a un atacante tomar el control de un sistema.

Las vulnerabilidades de algunos son las armas de otros. Si usted ha usado Internet en los últimos cinco años, su información ha sido cifrada y descifrada por ordenadores con el programa OpenSSL. SSL constituye la herramienta básica que está detrás de los candados que todos esperamos encontrar en los sitios web seguros. El famoso Heartbleed es el resultado de un error básico de programación en uno de los componentes de OpenSSL, Heartbeat («latido»), de ahí el nombre. El error permitía el acceso a los nombres de usuario, claves de seguridad y llaves criptográficas de los usuarios de un sitio web, haciendo irrelevante cualquier seguridad ofrecida por el cifrado SSL. OpenSSL ha tenido este error durante dos años, hasta que dos grupos de expertos (uno liderado por Neel Mehta, experto de seguridad en Google, y el otro en Codenomicon, en Finlandia) lo encontraron. Unos días después, la publicación *Bloomberg Businessweek* citó una fuente anónima que aseguraba que la NSA había usado este fallo durante años para realizar ciberespionaje.

Numerosas potencias mundiales han usado su talento tecnológico y muchos millones de dólares para encontrar y usar vulnerabilidades como Heartbleed. Los Gobiernos también compran vulnerabilidades en el mercado negro, con lo que contribuyen a sostener este tipo de comercio. Un número creciente de compañías como la francesa Vupen Security o la estadounidense Exodus Intelligence se especializan en el descubrimiento y venta de estos errores. De hecho, numerosos Gobiernos gastan más millones en desarrollar cibercapacidades ofensivas que en las defensivas. El Pentágono emplea a una multitud de analistas informáticos para que busquen vulnerabilidades, y la NSA gasta dos veces y media más en ciberinvestigación ofensiva que en la defensiva.

Ello no significa que los Gobiernos sean malvados o enemigos de la ciberseguridad. Es fácil rastrear el origen de algunas agencias como la NSA. Su trabajo es coleccionar datos de inteligencia para prevenir actos terribles y tiene sentido que usen cualquier método a su disposición. Pero un paso importante para aumentar la seguridad del ciberespacio es hacer un balance de costes y beneficios sobre las vulnerabilidades creadas por las agencias públicas. Otra clave es aprovechar al 100 por ciento aquello que los Gobiernos pueden hacer pero otras entidades no. Por ejemplo, pueden obligar a las compañías y otras organizaciones a compartir la información sobre los ciberataques.

Los bancos en particular se beneficiarían de compartir la información sobre ese tipo de agresiones, porque los ataques a las entidades financieras suelen seguir un patrón fácil de detectar: cuando los criminales encuentran que una determinada técnica funciona con un banco, lo intentan con otros. Pero aun así, los bancos son reacios a desvelar información sobre estos ataques por miedo a que pueda despertar dudas acerca de su seguridad. También evitan hablar con la competencia; en algunos casos, las leyes antimonopolio se lo prohíben explícitamente. Los Gobiernos, sin embargo, pueden facilitar el intercambio de información entre los bancos. De hecho, esto es ya una realidad en los Estados Unidos gracias al Centro de Intercambio de Información y Análisis de los Servicios Financieros (FS-ISAC, por sus siglas en inglés), que también presta servicio a las entidades financieras internacionales. En febrero, el presidente Barack Obama firmó una orden ejecutiva que alertaba sobre la necesidad de compartir este tipo de información entre compañías y con el Gobierno.

LOS *HACKERS* PUEDEN AYUDAR

Mientras los humanos escribamos código, van a existir vulnerabilidades. Debido a las presiones del mercado, las compañías tecnológicas lanzan productos cada vez más rápido. Estas harían bien en usar el vasto conocimiento adquirido por la comunidad *hacker*. Casos como el de las filtraciones de Edward Snowden acerca del espionaje de la NSA han demostrado que la industria tecnológica y la comunidad *hacker* pueden trabajar unidas. Cientos de compañías encuentran valioso involucrar a la comunidad *hacker* y ofrecen recompensas por descubrir errores o vulnerabilidades. Netscape Communications fue la primera en dar una recompensa por encontrar vulnerabilidades en su navegador Netscape allá por el año 1995. Veinte años más tarde, los datos demuestran que esta estrategia es una de las más eficientes en términos de coste-beneficio que esta organización y su sucesora, Mozilla, han adoptado para mejorar la seguridad de sus productos. Comunidades públicas y privadas de profesionales de la seguridad intercambian información sobre virus informáticos y vulnerabilidades, creando una especie de sistema inmunitario distribuido.

A la vez que el ciberespacio se expande, los fabricantes de coches, televisores y otros productos van a tener que empezar a pensar como compañías de ciberseguridad. Ello incluye invertir en seguridad ya en la fase de desarrollo de los productos y servicios —y no como una medida adicional o en respuesta a una nueva ley—. Aquí también puede ayudar la comunidad *hacker*. En 2013, los expertos en seguridad Joshua Corman y Nicholas Percoco lanzaron una plataforma llamada «Yo soy la caballería», que pedía a la comunidad *hacker* realizar investigación responsable en seguridad informática, con un énfasis en áreas críticas como infraestructuras públicas, automóviles, dispositivos médicos y tecnología para el hogar. Otra iniciativa, lanzada por los famosos expertos en seguridad Mark Stanislav y Zach Lanier, se llama BuilditSecure.ly, y persigue crear una plataforma para el desarrollo de aplicaciones seguras para la «Internet de las cosas».

Las buenas noticias son que ese sistema inmunitario distribuido está creciendo. En enero, Google lanzó un nuevo programa que complementa su programa de recompensas para cazadores de vulnerabilidades, que ofrece becas a los investigadores en seguridad que analizan sus productos. Es una forma de reconocer que incluso una compañía que dispone del mejor talento tecnológico del planeta puede usar a la comunidad *hacker*. También algunos Gobiernos se han subido al carro. La Agencia para la Ciberseguridad holandesa ha establecido un programa mediante el cual los *hackers* que informen de las vulnerabilidades no serán perseguidos.

Las malas noticias son que algunas de las medidas tomadas por la Administración de Obama en referencia a la ciberseguridad podrían resultar en una persecución de las herramientas comúnmente usadas para investigar vulnerabilidades, debilitando así ese sistema inmunitario. Muchos temen que tanto la versión actual de la Ley de Fraude y Abuso Informático como los cambios propuestos definan el delito informático de forma tan amplia que incluso seguir un vínculo que lleva a una página web con información confidencial o robada pueda considerarse tráfico de mercancía robada. Criminalizar el trabajo de los investigadores independientes en seguridad informática puede dañarnos a todos y ejercer un efecto mínimo en los criminales motivados por ideología o dinero.

RESPONSABILIDAD INDIVIDUAL

Los próximos años pueden ser complicados. Vamos a presenciar más brechas en la seguridad de los datos y lo más probable es que vivamos un intenso debate acerca de las libertades en el mundo digital, que tendremos que ceder a los Gobiernos a cambio de nuestra seguridad. La realidad es que la seguridad del ciberespacio va a requerir soluciones de índole muy distinta: técnicas, legales, económicas y políticas. Dependerá también de nosotros, el público. Como consumidores, debemos exigir a las compañías que mejoren la seguridad de sus productos. Como ciudadanos, debemos hacer a nuestros Gobiernos responsables cuando debilitan la seguridad de forma intencionada. Y, como individuos potencialmente vulnerables a los ciberataques, tenemos la responsabilidad de asegurar nuestros datos.

Defendernos conlleva unos pasos simples: mantener los programas actualizados, usar navegadores de Internet fiables y activar la autenticación por dos factores en nuestros correos electrónicos y cuentas en línea. Pero también es necesario que nos demos cuenta de que cada dispositivo constituye un nodo en una vasta red, y que decisiones pequeñas pueden entrañar grandes consecuencias. Como hemos dicho antes, la ciberseguridad es como la salud pública. Si nos lavamos las manos y nos vacunamos, podemos evitar una epidemia.

PARA SABER MÁS

War and anti-war: Survival at the dawn of the 21st Century. Alvin y Heidi Toffler. Little, Brown, 1993.
A fierce domain: Conflict in cyberspace, 1986 to 2012. Dirigido por Jason Healey. Cyber Conflict Studies Association, 2013.
Countdown to zero day: Stuxnet and the launch of the world's first digital weapon. Kim Zetter. Crown, 2014.
Hackers: The Internet's immune system. Keren Elazari, 2014. Esta charla en TED ha tenido más de 1,2 millones de visitas, ha sido traducida a 24 idiomas y escogida en la lista TED de «ideas más interesantes». **www.ted.com/talks/keren_elazari_hackers_the_internet_s_immune_system**

EN NUESTRO ARCHIVO

Espionaje en la Red. Whitfield Diffie y Susan Landau en *IyC*, noviembre de 2008.
Espionaje informático por canales indirectos. W. Wayt Gibbs en *IyC*, julio de 2009.
El buen uso de los macrodatos. Alex P. Pentland en *IyC*, octubre de 2014.


1995
TEMAS 1 Grandes matemáticos
TEMAS 2 El mundo de los insectos
Construcción de un ser vivo
TEMAS 4 Máquinas de cómputo
TEMAS 5 El lenguaje humano
TEMAS 6 La ciencia de la luz
TEMAS 7 La vida de las estrellas
TEMAS 8 Volcanes
TEMAS 10 Misterios de la física cuántica
TEMAS 12 La atmósfera
TEMAS 13 Presente y futuro de los transportes
Los recursos de las plantas
TEMAS 15 Sistemas solares
Calor y movimiento
TEMAS 17 Inteligencia viva
Epidemias
TEMAS 19 Los orígenes de la humanidad
La superficie terrestre
Acústica musical
TEMAS 22 Trastornos mentales
TEMAS 23 Ideas del infinito
TEMAS 24 Agua
Las defensas del organismo
El clima
TEMAS 27 El color
TEMAS 28 La consciencia
TEMAS 29 A través del microscopio
TEMAS 30 Dinosaurios
TEMAS 31 Fenómenos cuánticos
TEMAS 32 La conducta de los primates
TEMAS 33 Presente y futuro del cosmos
TEMAS 34 Semiconductores y superconductores
TEMAS 35 Biodiversidad
TEMAS 36 La información
TEMAS 37 Civilizaciones antiguas
TEMAS 38 Nueva Genética
TEMAS 39 Los cinco sentidos
TEMAS 40 Einstein
TEMAS 41 Ciencia medieval
TEMAS 42 El corazón
Fronteras de la física
TEMAS 44 Evolución humana
Cambio climático
Memoria y aprendizaje
TEMAS 47 Estrellas y galaxias
TEMAS 48 Virus y bacterias
TEMAS 49 Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
TEMAS 50 Newton
TEMAS 51 El tiempo
TEMAS 52 El origen de la vida
TEMAS 53 Planetas
TEMAS 54 Darwin
TEMAS 55 Riesgos naturales
TEMAS 56 Instinto sexual
TEMAS 57 El cerebro, hoy
TEMAS 58 Galileo y su legado
TEMAS 59 ¿Qué es un gen?
TEMAS 60 Física y aplicaciones del láser
TEMAS 61 Biodiversidad
TEMAS 62 Alzheimer
TEMAS 63 Universo cuántico
TEMAS 64 Lavoisier
TEMAS 65 Biología marina
TEMAS 66 La dieta humana
TEMAS 67 Energía y sostenibilidad
TEMAS 68 Alan Turing
TEMAS 69 La ciencia de la longevidad
TEMAS 70 Orígenes de la mente humana
TEMAS 71 Agricultura
TEMAS 72 Origen evolución universo
TEMAS 73 El sida
TEMAS 74 Taller laboratorio
TEMAS 75 El futuro de la energía I
TEMAS 76 El futuro de la energía II
TEMAS 77 Martin Gardner
TEMAS 78 Inteligencia animal
TEMAS 79 Comprender el cáncer
2015

por Sandra Mallol, Carmen Barberá y Raquel Goñi

El *maërl*, un bioingeniero amenazado

El lento crecimiento de este ecosistema y las condiciones peculiares de su desarrollo le confieren una gran vulnerabilidad

El término bretón *maërl* hace referencia a la comunidad bentónica dominada por algas calcáreas de vida libre que ruedan sobre el sustrato empujadas por el movimiento del agua, por lo que también reciben el nombre de rodolitos. Se trata de uno de los grupos de algas de más amplia distribución geográfica, climática (desde regiones polares hasta tropicales) y batimétrica (desde zonas intermareales hasta más de 100 metros de profundidad). Sin embargo, el desarrollo de esta comunidad se halla estrechamente vinculado a condiciones ambientales muy específicas que favorecen su pausado crecimiento, de alrededor de 1 milímetro por año. Al realizar la fotosíntesis con escasa intensidad lumínica, evita la competencia con las algas de crecimiento rápido, que precisan más luz. Por otra parte, los rodolitos necesitan corrientes lo bastante intensas para poder girar, de modo que la luz alcance a todos sus lados y puedan extenderse por todos ellos, al tiempo que evitan su enterramiento y el recubrimiento por parte de otros organismos sésiles e incrustantes.

Los fondos de *maërl* desempeñan varias funciones ecológicas importantes. Cabe destacar su papel como «bioingeniero», al componer un sustrato duro y complejo, con huecos y sinuosidades, que favorece el asentamiento de numerosas especies y el desarrollo de diversos microhábitats. Además, esta comunidad constituye un importante sumidero de carbonato cálcico del planeta, por lo que contribuye a estabilizar la acidez de los océanos.

En la actualidad, esta comunidad se ve amenazada por diferentes circunstancias. La contaminación y el consiguiente aumento de la turbidez de las aguas afectan negativamente su crecimiento. La creciente acidificación de los océanos altera la calcificación de su estructura. Por otra parte, la extracción del *maërl*, principalmente para uso como fertilizante agrícola, ha supuesto uno de los impactos más evidentes y graves, además de los efectos perjudiciales derivados de la pesca. Nuestro equipo está evaluando y caracterizando los impactos potenciales de las actividades pesqueras, como el arrastre de fondo y el trasmallo, sobre la estructura y cobertura de esta comunidad, así como su lenta recuperación, en la reserva marina de las islas Columbretes, en Castellón.

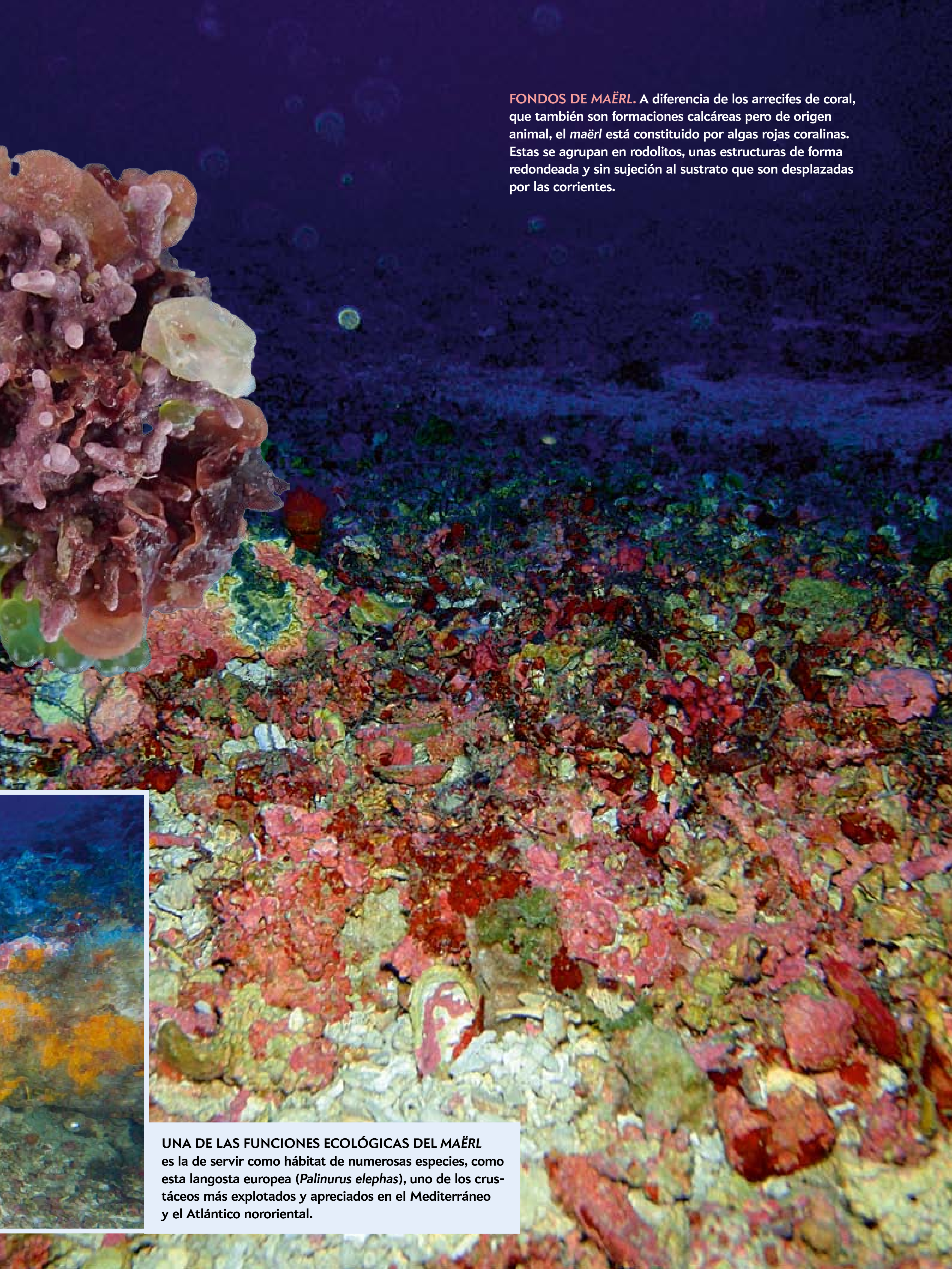
—Sandra Mallol, Carmen Barberá y Raquel Goñi
Centro Oceanográfico de Baleares
Instituto Español de Oceanografía,
Palma de Mallorca



RODOLITO DE *LITHOTHAMNIUM CORALLOIDES*, una de las especies de algas más comunes de las comunidades de *maërl* que medran en las aguas europeas. Los espacios que genera su compleja estructura ramificada permiten el asentamiento y crecimiento de otros organismos.



SANDRA MALLOL *(rodolito de L. coralloides)*; DAVID DÍAZ *(langosta y fondo de maërl)*



FONDOS DE *MAËRL*. A diferencia de los arrecifes de coral, que también son formaciones calcáreas pero de origen animal, el *maërl* está constituido por algas rojas coralinas. Estas se agrupan en rodolitos, unas estructuras de forma redondeada y sin sujeción al sustrato que son desplazadas por las corrientes.

UNA DE LAS FUNCIONES ECOLÓGICAS DEL *MAËRL* es la de servir como hábitat de numerosas especies, como esta langosta europea (*Palinurus elephas*), uno de los crustáceos más explotados y apreciados en el Mediterráneo y el Atlántico nororiental.

por W. Malcolm Byrnes

W. Malcolm Byrnes es profesor asociado en el departamento de bioquímica y biología molecular de la facultad de medicina de la Universidad Howard, en Washington.



El precursor olvidado de la epigenética

El embriólogo afroamericano Ernest Just propuso, en los años treinta del siglo XX, una teoría que prefiguró la actual concepción del desarrollo celular

Pese a los avances de las últimas décadas en la incorporación de minorías étnicas a la ciencia, los afroamericanos siguen estando poco representados en las disciplinas científicas. Según una encuesta realizada en 2010, la proporción de científicos o ingenieros negros es del 5 por ciento, pese a que la de la población negra en Estados Unidos es del 13 por ciento. La diversidad no es importante solo para equilibrar la representación social, sino también para estimular la creatividad científica.

El fisiólogo Robert Root-Bernstein identificó en su libro *Discovering* (1989) cuatro factores que inciden sobre el descubrimiento científico: el contexto cultural, la ciencia contrastada, la ciencia en construcción y los propios científicos. En cada investigador «se combinan de forma única sus inclinaciones hereditarias y las experiencias con su entorno».

La carrera de Ernest Everett Just muestra la importancia del contexto cultural. Just fue un prestigioso embriólogo afroamericano de la primera mitad del siglo XX. Tras graduarse en la Universidad de Dartmouth (1907) y doctorarse en la de Chicago (1916), obtuvo una plaza en la Universidad Howard, en Washington. Sus investigaciones se desarrollaron en el Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole y en laboratorios europeos. Publicó más de 70 artículos científicos y 2 libros, ambos en 1939. Uno de ellos, *The biology of the cell surface* («La biología de la superficie celular»), es su obra más importante. Just estudió los cambios estructurales que se producen en la superficie del óvulo durante la fecundación, y descubrió la relación entre la adhesividad de las células del embrión y las propiedades de la superficie celular.

En los años treinta, Just explicó el papel de las células del embrión en el proceso de desarrollo a partir de la interacción entre el núcleo y el citoplasma. Su «teoría de la restricción genética» era una hipótesis atrevida que contradecía la teoría genética. Además, representaba, como en un microcosmos, su visión de una sociedad perfecta, influenciada por los conceptos sociológicos que manejaba la comunidad intelectual afroamericana.

Pese al debate que generó, la teoría de la restricción genética no ejerció un influjo significativo sobre el desarrollo de la biología. Ello se debió a varias razones. Para empezar, la teoría genética daba más importancia al núcleo que al citoplasma. En segundo lugar, Just, a diferencia de otros científicos, no contaba con discípulos que continuaran su trabajo, porque su condición de afroamericano le impedía acceder a una universidad capaz de sostener un programa de investigación intensivo todo el año; en lugar de ello, investigaba a solas, durante el verano en Woods Hole o durante sus visitas a Europa. Además, su teoría no podía ser contrastada con los medios experimentales disponibles. Finalmente, sus colegas cuestionaban el que comulgara con la biología europea y retara a biólogos de prestigio. Por todo ello, y puede que también simplemente por ser afroamericano, se le consideraba un científico controvertido, lo que dificultaba la aceptación y citación de sus trabajos.

Como observa el historiador Kenneth Manning en su biografía de Just *Black Apollo of science* («El Apolo negro de la ciencia»), aunque los jóvenes científicos que en 1935 asistieron a la presentación de su teoría en el congreso de la Sociedad Americana de Zoología pidieron separatas de sus artículos y lo describieron como «uno de los zoólogos más creativos de los Estados Unidos», no aceptaron el reto de explorar sus ideas. La teoría de Just cayó así en el olvido.

Las cualidades de la teoría, sin embargo, han acabado por redimirla. Just se hallaba en una posición única para proponer nuevas ideas porque veía las cosas de modo distinto a los demás investigadores. Basaba la convicción en la certeza de sus ideas no solo en la experimentación, sino también en la propia experiencia vital. Sus colegas no tenían la misma determinación.

El entorno social y cultural

Just se forjó en un entorno social opresivo. La primera mitad del siglo XX estuvo marcada en los EE.UU. por las leyes Jim Crow de segregación racial, vigentes en Charleston (Carolina del Sur), la ciudad que le vio crecer, y en Washington, la ciudad en la que se estableció. Influyentes científicos partidarios de la eugenesia, como Henry F. Osborne, presidente del Museo Americano de Historia Natural, o Charles Davenport, zoólogo de Harvard y director del Laboratorio Cold Spring Harbor, sostenían que los negros eran biológicamente inferiores a los blancos. Creían que las razas humanas habían evolucionado a partir de especies distintas de homínidos en áreas geográficas diferentes, y que formaban una jerarquía con la subespecie blanca arriba y la negra abajo.

La comunidad afroamericana no se quedó de brazos cruzados ante la propaganda racista y la discriminación social. Desarrolló una intensa actividad intelectual para contrarrestar las acusaciones de inferioridad racial. El presidente de la Asociación Nacional para el Progreso de la Gente de Color (NAACP, por sus siglas en inglés), William E. B. du Bois, reputado sociólogo de la Universidad de Atlanta,

dedicó numerosos artículos y conferencias a refutar esa supuesta inferioridad. En un ensayo titulado «El científico negro», de 1939, rechazó el argumento de que las personas negras no eran aptas para la ciencia. Según Du Bois, la escasez de científicos afroamericanos no se debía a ninguna limitación inherente, sino a la discriminación racial. La creatividad científica no tenía fronteras, y negar el acceso a la ciencia a los afroamericanos privaba a la nación de las ventajas de contar con una comunidad científica diversa.

Du Bois se había graduado en Harvard y colaboraba con el antropólogo cultural Franz Boas, profesor en la Universidad de Columbia. Para Du Bois, el concepto de raza no tenía una base biológica, sino cultural, ya que representaba la historia compartida de un pueblo. Sus ideas insuflaron orgullo en la comunidad afroamericana. Escribió acerca del «décimo talentoso» (*talented tenth*), el grupo de élite formado por uno de cada diez afroamericanos que incluiría a los intelectuales más destacados. Just, por entonces el más célebre científico afroamericano del mundo, formaba parte de esa élite. También pertenecía a ella un colega de Just en la Universidad Howard, Alain Locke, «el filósofo del Renacimiento de Harlem».

Filósofo convertido en antropólogo, Locke sostenía que el éxito de las naciones dependía de la promoción del intercambio cultural entre grupos étnicos. La relación social más saludable era aquella en la que cada grupo era capaz de ofrecer algo valioso a los otros, respetando su autonomía mutua. No cabe duda de que Just estaba familiarizado con las ideas de Locke. Según Kenneth Manning, Just admiraba los conocimientos de Locke sobre cultura e historia afroamericanas, y su entusiasmo por la forma en que los negros se estaban liberando de «la psicología de la imitación y de su supuesta inferioridad».

Just invitó a uno de los discípulos de Boas, Melville J. Herskovits, a visitar Howard durante el curso 1924-1925. Para Herskovits, el concepto de raza era más sociológico que biológico. En *The myth of the negro past* («El mito del pasado negro»), un libro muy influyente publicado en 1941, mostró las raíces africanas ancestrales de la potente cultura afroamericana, argumentando que no era una versión inferior de la cultura americana predominante. Just y Herskovits seguirían escribiéndose años después del paso de Herskovits por Howard.



CORTESÍA DE SCURLOCK STUDIO RECORDS, CENTRO DE ARCHIVOS, MUSEO NACIONAL DE HISTORIA DE AMÉRICA, INSTITUCIÓN SMITHSONIANA

ERNEST E. JUST en su laboratorio de la Universidad Howard en 1916.

Si tenemos en cuenta el entorno intelectual de Just, es más que probable que le afectaran las ideas sobre la raza y el diálogo cultural de autores como Du Bois, Locke, Herskovits y Boas. Un ideario social que ejercería una poderosa influencia sobre su creatividad científica.

Una teoría novedosa

La biología del desarrollo embrionario experimentaba por entonces profundos cambios, que afectaban a la relación entre genotipo y fenotipo. Thomas Hunt Morgan, embriólogo de la Universidad de Columbia y ganador del premio Nobel en 1933, lideraba la disciplina emergente de la genética. A partir de sus experimentos con la mosca de la fruta, Morgan propuso que los genes, las unidades físicas de la herencia, se hallaban alineados en los cromosomas del núcleo celular. En *The theory of the gene* («La teoría del gen»), Morgan trazó una influyente distinción entre la genética y la embriología clásica. Los embriólogos como Just creían que todos los componentes de la célula participaban en los procesos de herencia y desarrollo, mientras que, para Morgan y los nuevos genetistas, el papel principal estaba reservado al núcleo y a los genes, que dirigían el proceso de desarrollo.

Las discrepancias entre genetistas y embriólogos se mantuvieron hasta la aparición de la biología evolutiva del desarrollo. Just fue uno de los científicos que buscaron la reconciliación. En *The biology of the cell surface* («La biología de la superficie celular»), ofreció una explicación de la participación de las células en el desarrollo contraria a la teoría genética

SEGÚN LA TEORÍA DE LA RESTRICCIÓN GENÉTICA DE JUST, la diferenciación celular era inducida por la acción combinada del citoplasma y el núcleo, lo que contradecía la teoría genética de Thomas Hunt Morgan. Hoy sabemos que si el primero puso demasiado énfasis en el citoplasma, el segundo lo puso en los genes. Según la epigenética actual, la diferenciación celular responde, en parte, a la acción de los factores de trasncripción (*bolas verdes y rojas*), proteínas que entran en el núcleo y se unen a los genes, estimulando o silenciando su expresión.

de Morgan. La restricción genética de Just se centraba en la interacción entre el núcleo y el citoplasma, y concedía más importancia a los factores citoplásmicos que a los nucleares.

El objetivo de Just era explicar el misterio de la diferenciación, es decir, la aparición de diferentes tipos de células en el embrión en desarrollo. La diferenciación suponía un problema para la teoría genética de Morgan: «¿Cómo podrían los genes dirigir la diferenciación, si son idénticos en cada célula? A menos que los genetistas piensen que sus genes son omnipotentes, no vemos cómo podría la teoría genética de la herencia resolver el problema de la diferenciación». Los datos experimentales de Just mostraban un incremento del material nuclear durante la segmentación embrionaria. Just notó que «el proceso de segmentación no comporta la desaparición del núcleo de ningún blastómero [célula embrionaria en el inicio del desarrollo]. Por otro lado, la cantidad total de sustancia nuclear es mayor al final del período de segmentación que al principio».

Tras revisar los datos, Just concluyó que la masa nuclear no solo aumentaba durante la segmentación, sino durante todo el desarrollo. Pero ¿cómo se sintetizaba el material nuclear? Al observar que la cantidad total de citoplasma disminuía durante el mismo período de tiempo, Just propuso que «los núcleos y sus elementos constituyentes, los cromosomas, se forman a partir del citoplasma».

Just presentó así su teoría: «La diferenciación progresiva del óvulo durante el proceso de segmentación... no responde a la acción de los cromosomas sobre el citoplasma ni a la segregación de material embrionario [una teoría rival explicaba la diferenciación a partir de la redistribución selectiva de factores ovulares preexistentes en distintas regiones del embrión]..., sino a una restricción genética de las potencias causada por el trasvase al núcleo de material citoplásmico». El núcleo de cada tipo de célula tomaba selectivamente parte del material del citoplasma, «liberando al resto de los materiales. Los materiales liberados determinan el carácter de la célula (ectodérmico, mesodérmico o endodérmico)».

El núcleo era para Just un agente más pasivo de lo que suponían los genetistas. Los factores citoplásmicos revestían mayor importancia, ya que, con la ayuda de los genes, dirigían la asignación a cada tipo de célula de sus propiedades particulares. Los genes cumplían la función secundaria de absorber uno u otro factor. Actualmente sabemos que Just se equivocó al restar relevancia a los genes, y que su teoría concedía una importancia excesiva al citoplasma. Pero la teoría de Morgan tampoco era del todo correcta, porque concedía demasiada importancia al núcleo.

Ochenta años después, los defectos de la teoría de Just son evidentes. La diferenciación celular responde, en parte, a la expresión diferencial de los genes: las proteínas conocidas como «factores de transcripción» entran en el núcleo y se unen a los genes, estimulando o reprimiendo su transcripción. La expresión diferencial de los genes de células de distintos tipos de tejidos explica las características de las distintas células. Es como si un circuito electrónico controlara la expresión de distintos conjuntos de genes en los diversos tipos de células durante las etapas del desarrollo.

El proyecto ENCODE (acrónimo de Enciclopedia del ADN, en inglés) nos ha enseñado que la expresión génica es más compleja de lo que creíamos [*véase* «La función reguladora del genoma», por Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013]. La actividad del genoma depende de numerosos factores y procesos. Los factores de transcripción son importantes, pero también los son otras características. Los patrones de modificación química (metilación, acetilación) y la estructura tridimensional de la cromatina (el complejo de ADN, ARN y proteínas que compone los cromosomas) afecta también la expresión génica. Además, la regulación epigenética puede producir-

se también a través de la modificación postranscripcional del ARN mensajero, que codifica las proteínas, o a través de su degradación o inhibición mediante la unión de microARN.

Los ARN no codificantes, aquellos cuya transcripción no produce una proteína, participan asimismo en la regulación de la expresión génica. El proyecto ENCODE muestra que el 80 por ciento del ADN del genoma humano es «funcional», ya sea porque los factores de transcripción u otras proteínas se unen a él, o porque se transcribe activamente en ARN. Pero muchas de estas transcripciones son no codificantes e ignoramos su función.

Estamos comprobando que hay muchas vías de interacción entre los factores del citoplasma y los genes del núcleo. Estamos reconociendo también la importancia de los procesos físicos. Cada vez es menos sostenible la idea de que hay un flujo unidireccional de información del ADN al ARN mensajero y de este a las proteínas, el proceso ideado por los genetistas de principios del siglo xx y que devino el dogma central. El auge de la epigenética, que estudia la interacción entre los factores extranucleares y los genes en la formación del fenotipo, ha confirmado algunas de las ideas de Just. Puede que se equivocara en los detalles, pero acertó al subrayar la importancia de la interacción entre el núcleo y el citoplasma.

Influencias culturales únicas

Los trabajos de Just revelan una concepción del funcionamiento de la célula muy distinta de la que proponía el entonces emergente campo de la genética. ¿En qué se inspiró Just? ¿Qué le convenció de que todas las partes de la célula, y no solo el núcleo, resultaban claves en el desarrollo?

Reflexionando sobre el contexto cultural de Just, me pregunté si su noción de un «federalismo de la célula» —por usar una expresión del biólogo Scott Gilbert, del Colegio Swarthmore— debía algo a las ideas sobre la raza y las relaciones raciales que manejaba por entonces la comunidad afroamericana. Se recordará que, en la teoría de Just, el núcleo secuestra ciertos factores del citoplasma durante la diferenciación, permitiendo a los factores restantes dirigir a la célula en una dirección determinada. La restricción genética eliminaba ciertas potencias del citoplasma, «liberando a las otras».

De modo análogo, los afroamericanos intentaban liberarse de una sociedad opresiva y segregada. Pese a la marginación, la comunidad negra contaba con numerosos talentos. Creo que las ideas de Just sobre el papel del citoplasma en la diferenciación celular fueron inspiradas por conceptos sociológicos que estaban al orden del día. Just veía la célula como un microcosmos de la sociedad humana, en la que grupos considerados marginales desempeñaban una función importante.

Hay precedentes al uso de ideas no científicas para formular hipótesis científicas. El biólogo Francisco Ayala trata en su libro *Darwin's gift to science and religion* («El obsequio de Darwin a la ciencia y la religión») del surgimiento de las hipótesis: «los científicos, como cualquier persona, tienen ideas nuevas y adquieren el conocimiento de muchas formas: conversando, leyendo libros y periódicos, mediante generalizaciones inductivas, a veces incluso soñando o realizando observaciones erróneas».

Tomar prestadas hipótesis de otros ámbitos no es tan raro como parece. Root-Bernstein pone el ejemplo del patólogo celular del siglo xix Rudolf Virchow, que vinculó el desarrollo biológico con el de la sociedad. El paleontólogo de Harvard Stephen Jay Gould estuvo asimismo muy influenciado por el materialismo dialéctico. Finalmente, es bien sabido que Charles Darwin incorporó a la teoría de la selección natural las ideas de Thomas Malthus, el economista británico que creía que la supervivencia de una población dependía de la relación entre su ritmo de crecimiento y los recursos disponibles.

El joven Darwin, ávido naturalista desde su infancia, había viajado alrededor de Sudamérica a bordo del *HMS Beagle*. Estaba familiarizado con la gran diversidad de la vida. Se podría argumentar que Darwin más que nadie, con la posible excepción de Alfred Russel Wallace, codescubridor de la selección natural, estaba especialmente preparado para hacer esta contribución singular a la biología.

De modo parecido, Just estaba especialmente preparado para comprender la interacción entre el núcleo y el citoplasma durante el desarrollo. Es razonable pensar que incorporó a su hipótesis sobre el funcionamiento de la célula las ideas de su entorno intelectual. Al fin y al cabo, no solo estaba más expuesto a ellas que el resto de sus colegas, sino que tenían para él un significado más inmediato. Si la idea que ayudó a cristalizar la teoría de Darwin provenía del ámbito de la economía, la visión de Just sobre el desarrollo celular estaba inspirada en el pensamiento social afroamericano.

La importancia de la diversidad

La diversidad es esencial para la ciencia. No sabemos dónde surgirá el próximo Darwin o el próximo Just, pero podemos estar seguros de que su experiencia y su entorno serán únicos. ¿Qué experiencias vitales estimularán las ideas que revolucionarán la ciencia? Sofocar la diversidad o, simplemente, no promoverla, reduce la capacidad creativa de la ciencia.

Pese a que prefiguraba la epigenética, la teoría de Just no tuvo un impacto notable en la biología. Sus colegas no sabían qué pensar de él, porque su excelencia científica no encajaba con la idea de aquellos de lo que debía ser un afroamericano. Para el economista sueco Gunnar Myrdal, Just era «el ejemplo paradigmático de un dilema americano».

La historia de la teoría de Just muestra la importancia de la diversidad para la ciencia. La representación de todos los grupos sociales hace que la evaluación de méritos esté menos sesgada. Más aún: la diversidad de ideas, favorecida por la diversidad étnica, cultural, o de otro tipo, constituye la esencia misma de la ciencia [*véase* «Estado de la ciencia global 2014», *informe especial sobre la importancia de la diversidad social en ciencia*; Investigación y Ciencia, diciembre de 2014]. Sin ella, las viejas ideas del pasado circulan con libertad, en detrimento de la empresa científica.

PARA SABER MÁS

The Negro scientist. W. E. B. du Bois en *The American Scholar*, págs. 309-320, septiembre de 1939.
The biology of the cell surface. E. E. Just. P. Blakiston's Son, Philadelphia, 1939.
Black Apollo of science: The life of Ernest Everett Just. K. R. Manning. Oxford University Press, Nueva York, 1983.
Cellular politics: Ernest Everett Just, Richard B. Goldschmidt and the attempt to reconcile embryology and genetics. S. F. Gilbert en *The American Development of Biology*, dirigido por R. Rainger, D. Benson y J. Maienschein, págs. 311-346. University of Pennsylvania Press, Filadelfia, 1988.
Race unmasked: Biology and race in the 20th century. M. Yudell. Columbia University Press, Nueva York, 2014.

por V. Ramón Vallejo



V. Ramón Vallejo es profesor titular de biología vegetal de la Universidad de Barcelona y coordinador científico del Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo de Valencia.

¿Podremos salvar los suelos?

Pese a la alarmante situación de las tierras del planeta, los intentos oficiales para frenar su degradación no pasan de meras declaraciones de buenas intenciones

Adán deriva del femenino hebreo *adama*, que significa «suelo»; *Eva* proviene de *hava*, que significa «vida». Adán y Eva representaban, por tanto, el suelo y la vida. Las civilizaciones antiguas reconocían la importancia del suelo en el sostenimiento de la agricultura. ¿Cuál es la situación actual?



La roturación de las tierras para el cultivo iniciada en el Neolítico seleccionaba las zonas llanas y de suelos más productivos (valles, llanuras deltaicas, suelos de la vega de los ríos). Ello permitió aumentar de forma extraordinaria la producción de alimentos y supuso un hito en el desarrollo humano. Sin embargo, el avance de la agricultura ha tenido también efectos colaterales negativos sobre el suelo. La civilización sumeria acabó arruinada con la degradación de los suelos por salinización asociada al riego. Según ha ido aumentando la población, se han ido roturando tierras de menor calidad y más vulnerables. Y los suelos se han ido abandonando conforme perdían productividad. El resultado: en la actualidad, un tercio de las tierras del planeta están degradadas.

Hallamos un caso singular en las ciudades históricas que han devenido conurbaciones. Para la fundación de estas urbes se seleccionaban zonas bien comunicadas y ricas en recursos básicos como agua y tierra fértil. Los suelos poco productivos, con frecuencia promontorios, se dedicaban a la edificación (pensemos en la Barcino romana); los de buena calidad, en cambio, se convertían en el «huerto» que sustentaba a la ciudad. El extraordinario crecimiento urbanístico que han experimentado algunos de estos núcleos durante el último siglo se ha llevado a cabo sin considerar la calidad agrícola de los suelos, y los cultivos productivos de la periferia se han destruido sin más.

La reserva mundial de tierras potencialmente cultivables se encuentra en los trópicos, sobre todo en Amazonía, aunque son suelos de baja fertilidad natural. Sin embargo, estas selvas sufren cada año una importante deforestación, con nefastas consecuencias para la biodiversidad, el aumento del carbono atmosférico y el calentamiento global.

Hoy avanza más la población mundial que la roturación de nuevas tierras (una vez descontadas las superficies abandonadas). En consecuencia, ha disminuido la disponibilidad de cultivos: en 1960 era de 0,45 hectáreas cultivadas por persona, en 2010 de 0,23 y sigue bajando. También es cierto que en 1960 se necesitaban en promedio 0,45 hectáreas para alimentar a una persona y en 2006 se requieren solo 0,22, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Es decir, que la productividad de las tierras cultivadas ha aumentado de forma notable.

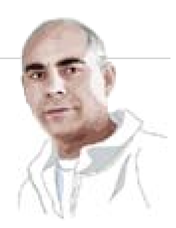
Frente a la situación de degradación del capital edáfico, los organismos internacionales han reaccionado con campañas de sensibilización y propuestas de conservación. Este año 2015 ha sido declarado por las Naciones Unidas Año Internacional de los Suelos. La alerta de la importancia mundial de la degradación de las tierras en países de clima seco se dio a raíz de las hambrunas que se produjeron en el Sahel en los años setenta; más tarde (1994), dio por resultado el convenio de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación.

Si se proyecta el ritmo actual de degradación de tierras a un horizonte de 25 años, la producción de alimentos se reducirá en un 12 por ciento, con lo que difícilmente se podrán garantizar las necesidades de una población mundial que sigue aumentando. Ante esta perspectiva, en la cumbre Río+20 se propuso el objetivo de «degradación neta cero de las tierras», que pretende mantener la superficie de tierras productivas en el planeta a través de la reducción de los procesos de degradación y la restauración de tierras ya degradadas, de manera que el balance final sea cero. El objetivo global es loable, pero los mecanismos de implementación deberán evitar que se intente justificar la destrucción de tierras de buena calidad con la restauración de tierras poco productivas, porque ambos procesos no son equivalentes ni en términos energéticos ni en el resultado final de la calidad del suelo compensado.

En Europa, la Comisión Europea puso en marcha en 2006 una propuesta de Directiva Marco sobre el Suelo, que fue adoptada por el Parlamento Europeo y que luego se pasó ocho años bloqueada en la mesa de discusión del Consejo de Europa, hasta que se retiró en 2014. De momento, tenemos solo unas buenas intenciones genéricas sobre los retos de la degradación del suelo y la importancia de su protección en la Unión Europea, sin ninguna concreción de cómo se van a abordar. Veremos en qué se traducirán, pero algo habrá que hacer antes de que la pérdida de suelos de calidad sea irreversible.

THINKSTOCK/VIKTOR PRAVDICA

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.

Liofilizados, ¿alimentos del futuro?

De la comida para astronautas a la sociedad

Liofilizar consiste en deshidratar un producto congelado. El agua se elimina por sublimación (paso directo de sólido a gas), debido a la baja presión parcial del vapor de agua [*véase* «Liofilización», por Herbert Aschkenasy; Investigación y Ciencia, noviembre de 1996]. Las bajas temperaturas a las que se produce esta extracción evitan la alteración del producto y la pérdida de nutrientes, sabores y aromas. Ya la utilizaban los incas para obtener *chuño* de patatas u otros tubérculos; para ello aprovechaban el contraste del frío nocturno (congelación) y el calor del sol durante el día junto con las bajas presiones debidas a la altura de los Andes (sublimación).

En importancia y producción de liofilizados, la industria farmacéutica y la biotecnológica están muy por encima de otros campos. Proteínas, enzimas, hormonas, vacunas y otros productos biológicos son liofilizados de forma habitual. La técnica se aplica también a la recuperación de documentos dañados en inundaciones, a la conservación de animales domésticos fallecidos o a la preservación de plantas y hongos para archivos o exposiciones.

Los alimentos liofilizados suelen asociarse a los astronautas. Ya en el programa Gemini, que se inició en 1965 como preámbulo al conocido Apolo, se utilizaron productos liofilizados para alimentar a la tripulación. En 2005, Filippo Castrucci, del Centro Europeo de Astronautas realizó un informe para la Agencia Europea del Espacio titulado «Requerimientos nutricionales para las misiones espaciales». Concluyó que los alimentos liofilizados rehidratados satisfacían los requisitos nutricionales de la tripulación, pero no resultaban lo bastante apetitosos; recomendaba que se tuvieran en cuenta las preferencias gastronómicas de los astronautas. En la misión orbital a Marte planeada para 2033, seguro que los liofilizados serán unos de los protagonistas de la dieta.

Otro campo de aplicación de estos productos es el deportivo. A principios de los años setenta del siglo pasado, la empresa Oregon Freeze Dry empezó a comercializar Mountain House, su línea de alimentos liofilizados para actividades de ocio al aire libre. La masificación de este tipo de actividades ha propiciado que otras empresas hayan seguido sus pasos.

En el plano gastronómico, la liofilización no empezó a tenerse en cuenta hasta que, en el año 2005, entró en la cocina de El Bulli para dar lugar a la *espuma de zanahoria*, el *polvo de menta*, el *bizcocho de pistacho* y muchas otras. El Celler de Can Roca y muchos otros restaurantes han continuado la estela, lo que ha consolidado el valor gastronómico de los productos liofilizados. Si estos se convierten o no en ingredientes habituales en nuestra cocina, dependerá de su calidad culinaria, competitividad económica y facilidad de uso.



ESPUMA de zanahoria liofilizada.

RESTAURANTE EL BULLI

La perfecta conservación de los alimentos liofilizados es su principal ventaja; el inconveniente, el alto coste económico. Que su precio sea tan elevado se debe al largo tiempo requerido para el proceso. La velocidad típica de sublimación es de 1 milímetro de producto liofilizado por hora (se mide el avance lineal del fenómeno); pero puede llegar a ser mucho más lenta, debido a las dificultades de la transferencia de calor en medios no regulares. Para reducir los costes, deben pues investigarse métodos que permitan acortar los tiempos sin perjudicar la calidad del producto. Varias investigaciones van en esta dirección.

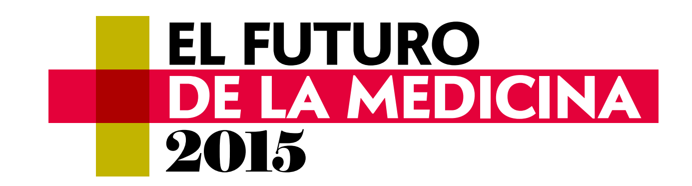
Un artículo publicado por M. Zhang, de la Universidad de Yangtze Meridional, y sus colaboradores en *Trends in Food Science & Technology* en 2006, mostraba ya una posible solución, basada en combinar la liofilización con el calentamiento mediante microondas. La velocidad de la liofilización viene limitada, sobre todo, por la lentitud de la sublimación (que requiere un aumento de la temperatura por calentamiento exterior). La aplicación de las microondas permite, en cambio, que las moléculas de agua se calienten y, por tanto, evaporen, de forma mucho más rápida.

Los mismos investigadores publicaron en 2010 en *Drying Technology* y en *Journal of Food Engineering* sendos trabajos sobre esta combinación de técnicas, donde avanzaban en la calidad del producto (conservación de las propiedades organolépticas y nutricionales) y disminuían los costes de producción.

El pasado febrero, el grupo de Duan Xu, de la Universidad de Jiangnan, publicó en *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* un estudio que compara la eficiencia de varios métodos de secado por sublimación de setas. Aunque los experimentos muestran que la liofilización clásica sigue siendo la mejor técnica para preparar hongos secos de calidad, ya empiezan a obtenerse muy buenos resultados con la combinación de la liofilización y las microondas, el nuevo método llamado MFD (de *microwave freeze drying*).

En la columna de julio de 2008 ya imaginábamos un gazpacho liofilizado. Al ritmo que avanzan las investigaciones actuales, la sopa veraniega por excelencia no será la única en llegar liofilizada al supermercado. Pronto contaremos con muchas otras elaboraciones saludables y sabrosas que enriquecerán nuestra despensa.





NANOTECNOLOGÍA PARA DIAGNOSTICAR Y CURAR ENFERMEDADES

Trabajar a pequeña escala ofrece nuevas maneras de luchar contra el cáncer, sanar heridas y hacer llegar medicamentos a las células

Josh Fischman

El ADN, la molécula que contiene las instrucciones para la vida, posee un diámetro de unos 2,5 nanómetros (un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro). Los científicos tienen hoy la capacidad de modificar y construir moléculas de ese tamaño, así como de crear dispositivos y controlarlos con una precisión sin precedentes. Estas destrezas, adquiridas a través de un trabajo minucioso llevado a cabo durante la última década, están llevando a la producción de nuevos medicamentos y al desarrollo de técnicas novedosas para diagnosticar enfermedades. En este artículo especial, examinamos los avances actuales de la nanomedicina y los que probablemente nos traerá el futuro.

En la actualidad, la quimioterapia constituye un objetivo principal de la nanomedicina. Se están generando fármacos tan pequeños que pueden penetrar en aquellos tumores en los que los medicamentos tradicionales no surtían efecto [*véase* «Fármacos dirigidos contra el cáncer» *en la página 54*]. Las pruebas diagnósticas también están avanzando gracias a la nanotecnología: el empleo de sondas de ADN con formas inusuales permite detectar el cáncer con una alta precisión. Y en un futuro cercano, los pacientes utilizarán vendajes inteligentes hechos con moléculas nanométricas que potenciarán el efecto curativo en heridas profundas o informarán a los médicos de cuándo no está funcionando el tratamiento [*véase* «Un vendaje inteligente» *en la página 57*]. Más adelante, se espera poder unir minúsculos motores moleculares a los fármacos para poder dirigirlos a través de la sangre hasta su objetivo [*véase* «Nanobots terapéuticos» *en la página 60*]. Estas hazañas de la nanoingeniería, aunque resulten invisibles a nuestros ojos, podrían ejercer un efecto mayúsculo sobre la salud.

ILUSTRACIONES DE HARRY CAMPBELL

Josh Fischman *es redactor de* Scientific American.





Dina Fine Maron es redactora de *Scientific American*.

LA NANOMEDICINA HOY

FÁRMACOS DIRIGIDOS CONTRA EL CÁNCER

Unos vehículos minúsculos liberan una mayor cantidad de medicamento en los tumores y reducen los efectos secundarios

Dina Fine Maron

EN SÍNTESIS

Los fármacos empleados en quimioterapia no siempre alcanzan su objetivo. El organismo los ataca, no pueden atravesar los tumores o confunden a menudo las células sanas con las cancerosas.

Mediante el recubrimiento de estos fármacos con envoltorios diminutos se ha logrado evitar estos problemas. El control minucioso sobre la composición de esta cubierta ha permitido crear fármacos que no disparen la alarma del sistema inmunitario y puedan llegar a los tumores.

Tales medicamentos se hallan en las últimas etapas de los ensayos clínicos. También se están desarrollando nanopartículas que no solo funcionen como simples vehículos, sino que ellas mismas silencien los genes que causan el cáncer.

El cáncer juega a un escondite mortal en el organismo, y a menudo los medicamentos que se emplean para detenerlo no logran vencerlo, como tampoco los pacientes. Estas sustancias no distinguen bien las células tumorales de las sanas. De hecho, a veces actúan sobre estas últimas y causan unos terribles efectos secundarios, mientras que las células cancerosas permanecen inalteradas. También puede suceder que las propias defensas del cuerpo, el sistema inmunitario, confundan los antineoplásicos con bacterias patógenas, u otros invasores externos, y los destruyan. Entonces, los fragmentos resultantes son transportados hasta los contenedores de desecho del cuerpo, en el hígado, los riñones y el bazo, sin poder alcanzar su objetivo. Pero incluso cuando los fármacos consiguen llegar al tumor, muchos de ellos se enredan en la densa maleza de la masa tumoral, incapaces de atravesarlo por completo.

Gracias a los avances en nanomedicina, los fármacos pueden salvar ahora esa complicada geografía y atacar los tumores directamente allí donde se ubican. La invención consiste en un vehículo diseñado para transportar medicamentos, envuelto



Los nanofármacos, con su diseño y cubierta protectora, pueden llegar a los tumores sin ser antes destruidos por las defensas del organismo

por una cubierta externa para proteger su carga en su viaje a través del cuerpo. La posibilidad de escoger los componentes de estos vehículos, de apenas un nanómetro, ha permitido a los científicos crear una arquitectura especializada que, entre otras cosas, no dispare la alarma del sistema inmunitario. Kazunori Kataoka, de la Universidad de Tokio, y sus colaboradores han insertado potentes fármacos dentro de un envoltorio del tamaño de un virus de la hepatitis C, unas 200 veces más pequeño que un glóbulo rojo. A escala molecular, estos fármacos se asemejan mucho a las sustancias que sintetiza el propio organismo. También tienen la ventaja de poder deslizarse dentro de los tumores sin afectar a las células sanas.

Ya hay varias versiones de estos nanovehículos desarrolladas por el equipo de Kataoka que transportan diversos medicamentos a distintos tipos de tumores; se hallan en las etapas finales de ensayos clínicos realizados en Asia. Estos compuestos han logrado retrasar o invertir la progresión de la enfermedad en pacientes con cáncer de mama o de páncreas. Mientras, otros tipos de nanopartículas están en la segunda fase de ensayos clínicos en EE.UU. «Las etapas iniciales de desarrollo con esta tecnología llevan tiempo, pero se trata de un campo muy prometedor que ya está cosechando sus primeros frutos», opina Kataoka. «Los avances se acelerarán en los próximos cinco años.»

FÁRMACOS DISFRAZADOS

El uso de la nanotecnología en la lucha contra el cáncer no es una idea nueva. En el mercado ya existen algunos nanomedicamentos, como Abraxane, para el cáncer de mama metastásico, y Eligard, para el cáncer de próstata avanzado. Pero estos compuestos atacan solo a ciertos tumores, por lo que es necesario desarrollar más tratamientos. Avances recientes en ingeniería han permitido modificar la estructura de los nanovehículos para que actúen con una mayor precisión contra una gama más amplia de neoplasias. Las nanoterapias que se están ensayando en la actualidad, administradas mediante una inyección intravenosa, parecen eliminar los tumores con mayor eficacia.

La mayoría de esos nanovehículos encierran los fármacos dentro de una envoltura blanda punteada con polietilenglicol, un material sintético que funciona como una capa protectora. Esta capa atrae las moléculas de agua, por lo que el nanovehículo queda rodeado por un líquido muy habitual en el organismo. El agua ayuda a neutralizar las cargas eléctricas de la nanopartícula, que de otra manera alertarían al sistema inmunitario de la presencia de una sustancia extraña.

El líquido también cubre y alisa los bordes de las nanopartículas y dificulta la adhesión de cualquier elemento del sistema inmunitario, como los anticuerpos. El tamaño de la nanopartícula, algo mayor que un antineoplásico tradicional, ayuda a garantizar que esta no sea desintegrada enseguida por las enzimas del cuerpo. Esa resistencia a la degradación confiere más tiempo al fármaco para alcanzar el tumor y ejercer su acción. La primera nanoterapia aprobada para tratar el cáncer,

Doxil, se mantiene en la circulación sanguínea durante mucho más tiempo que su equivalente tradicional, la doxorubicina. Ambos medicamentos se utilizan en el cáncer de ovario, pero la versión nanotécnica, con su diseño y cubierta protectora, llega más fácilmente a los tumores sin ser destruida por los mecanismos de defensa del organismo. La textura blanda y flexible de los nuevos medicamentos también les permite esquivar uno de los obstáculos finales: el ecosistema denso e irregular del tejido maligno, donde se quedan atrapados los fármacos de estructura más rígida.

El poder curativo de las nanopartículas se aloja en su interior. Debido a que su cubierta se disuelve en ácido, solo se desintegrarán y liberarán la carga cuando abandonen el ambiente neutro del torrente sanguíneo y se introduzcan en el tumor, que presenta una acidez mucho mayor.

Para dirigir mejor los nanovehículos hacia los tumores sin que ataquen a las células sanas, otros investigadores están intentando recubrirlos con anticuerpos que reconozcan y se unan a moléculas particularmente abundantes en las células cancerosas, como la proteína EFFR. El bioingeniero Dean Ho, de la Universidad de California en Los Ángeles, ha demostrado en experimentos preliminares que las nanopartículas pueden recubrirse con anticuerpos que se unen a EGFR, según publicó en la revista *Advanced Materials* en 2013.

También existe la posibilidad de construir nanopartículas que funcionen ellas mismas como medicamentos, y no solo como vehículos de entrega. Investigadores de la Universidad Noroccidental las crearon a partir de fragmentos de oro y material genético (ARN) con capacidad de anular los genes causantes del cáncer. Debido a su reducido tamaño y a otros factores todavía por determinar, estas nanopartículas pueden alcanzar uno de los lugares más inaccesibles para un fármaco: el cerebro. En octubre de 2013, el equipo demostró que tales compuestos habían logrado atravesar la barrera hematoencefálica (un conglomerado de pequeños capilares sanguíneos) y dirigirse a tumores cerebrales en animales. Aunque esta estrategia experimental redujo el tamaño total del tumor en roedores, al final los animales murieron de cáncer, comenta Alexander Stegh, de la Universidad Noroccidental. Todavía se está examinando el modo exacto en que las nanopartículas lograron superar la barrera hematoencefálica, añade el experto. Es posible que la estructura de estas se una a las moléculas receptoras de la superficie de las células de los vasos sanguíneos, y tales moléculas facilitarían su entrada.

En la actualidad, se está investigando el uso de otros tipos de nanopartículas compuestas de ácidos nucleicos para detectar células cancerosas que circulan por la sangre. Chad A. Mirkin, químico de la Universidad Noroccidental que lidera el proyecto, apunta que este estudio podría llevar al descubrimiento de nanopartículas que transporten no solo sustancias que sirvan para diagnosticar un tumor, sino también medicamentos, una combinación formidable que podría terminar con él antes de que se extendiera a otros lugares. El diseño de un dispositivo de este tipo marcaría un antes y un después en el tratamiento del cáncer.

SEGUIR LA ENFERMEDAD

Bengalas para detectar el cáncer

Unas esferas diagnósticas de ADN buscan y marcan las células cancerosas

El cáncer se propaga. Los tumores voluminosos liberan células que se desplazan a través del cuerpo y desarrollan nuevos tumores en otros lugares. Ahora, los investigadores están trabajando a escala nanométrica para obtener ADN en forma de esfera (en lugar de su famosa forma en doble hélice), con la capacidad de identificar, marcar y quizá destruir las células tumorales.

Las esferas se parecen a una bola de gomaespuma con palillos de dientes clavados en la superficie. Los palillos corresponden a una masa densa de cadenas sencillas de ADN que se proyectan desde un núcleo central hacia el exterior. El ADN se elige por su capacidad de unirse al ADN complementario que hay en las células cancerosas. Cuando se produce esta unión, unas minúsculas moléculas luminiscentes pegadas al extremo del ADN de la esfera se desplazan y emiten un destello de luz que indica la presencia del cáncer. Cuanto más ADN canceroso haya, más brillante será el destello, explica Chad A. Mirkin, químico y director del Instituto Internacional de Nanotecnología en la Universidad Noroccidental, que ha liderado la investigación.

Estas reacciones se producen en muestras de sangre de los pacientes: cuando las esferas tropiezan con una célula cancerosa, se introducen en ella a través de los poros de su membrana. Como las esferas poseen una mayor superficie que otras formas geométricas, el ADN que las recubre tiene una probabilidad mucho mayor de hallar ADN canceroso y acoplarse a él que si se tratara de filamentos de ADN aislados. Los ácidos nucleicos esféricos se unen a otros ácidos nucleicos con una fuerza cien veces mayor.

Las esferas de Mirkin, también llamadas «nanobengalas», ya se están utilizando en los hospitales para el diagnóstico rápido del cáncer. Otros sistemas detectan células muertas del tumor a partir de las proteínas que estas presentan en la superficie, pero como las esferas también identifican células vivas, comenta Mirkin, se podría estudiar la respuesta de estas últimas a distintos fármacos para desarrollar tratamientos personalizados.

__Joshua A. Krisch__ es redactor científico.

PARA SABER MÁS

Nanoparticle PEGylation for imaging and therapy. Jesse V. Jokerst et al. en *Nanomedicine*, vol. 6, n.º 4, págs. 715-728, junio de 2011. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3217316**

Nanomedicine: Towards development of patient-friendly drug-delivery systems for oncological applications. R. Ranganathan et al. en *International Journal of Nanomedicine*, vol. 7, págs. 1043-1060, febrero de 2012. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3292417**

Progress of drug-loaded polymeric micelles into clinical studies. Horacio Cabral y Kazunori Kataoka en *Journal of Controlled Release*, vol. 190, págs. 465-476, septiembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanotécnica en medicina. A. Paul Alivisatos en *IyC*, noviembre de 2001.

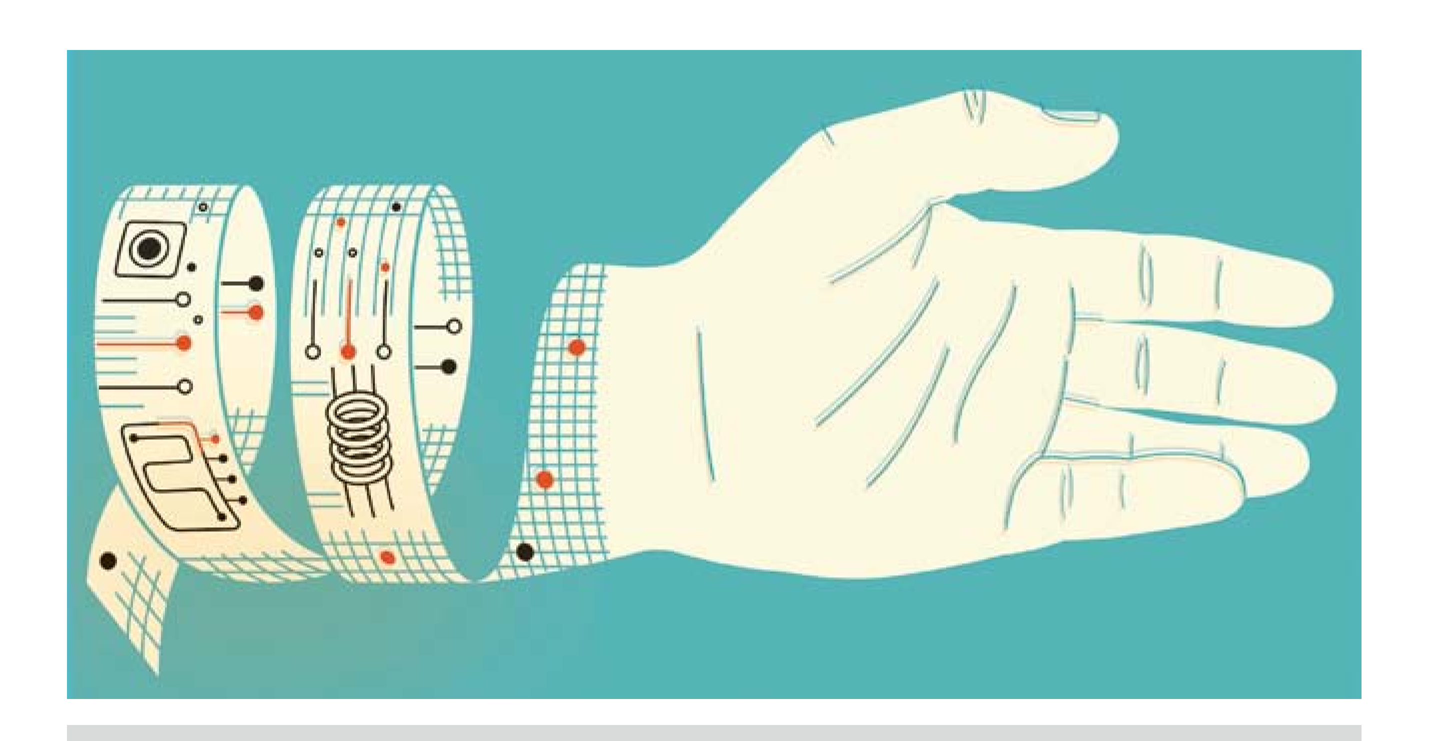
Nanomedicina contra el cáncer. James R. Heath, Mark E. Davis y Leroy Hood en *IyC*, abril de 2009.

LA NANOMEDICINA QUE VIENE

UN VENDAJE INTELIGENTE

Los nuevos materiales no solo protegerán las heridas, sino que alertarán de complicaciones y administrarán fármacos

Mark Peplow



Los soldados heridos habían recibido un tratamiento adecuado desde su vuelta de Afganistán. En el Centro Médico Militar de San Antonio, en Texas, los cirujanos habían realizado cuidadosos injertos de tejido sano en sus quemaduras y heridas, y mediante microcirugía habían conectado sus vasos sanguíneos con la piel nueva. Pero los pacientes todavía tendrían que hacer frente a una recuperación incierta, ya que quizá los vasos no lograran suministrar suficiente oxígeno para que los trasplantes prosperasen.

Cuando Conor Evans visitó San Antonio en 2010 y vio a esos soldados, se dio cuenta de que las técnicas clásicas para medir los valores de oxígeno no funcionaban muy bien y a menudo no advertían si el injerto fallaba. «Estos médicos llevan a cabo una labor impresionante», comenta Evans, químico de la Escuela Médica de Harvard y del Centro Wellman de Fotomedicina del Hospital General de Massachusetts, «pero los sensores que usan no son suficientemente sensibles».

Así que decidió crear un vendaje mejor. Se le ocurrió mezclar tintes que reaccionaran ante diferentes niveles de oxígeno con unas nanomoléculas que detectan la actividad del tinte. Obtuvo así un vendaje líquido que puede evaluar la salud de la herida a la que se aplica. «El líquido cambia de color como un semáforo; de verde a rojo pasando por ámbar, dependiendo de la cantidad de oxígeno presente en la herida», explica Evans. Después de ensayarlo con éxito en animales de laboratorio en 2014, prevé iniciar estudios con humanos este año.

Sirviéndose de las nuevas técnicas de manipulación de materiales nanométricos, él y otros investigadores pueden no solo mejorar el diagnóstico de una herida, sino también convertir las vendas en sistemas de administración de fármacos. «La nanotecnología ofrece la posibilidad de controlar la cantidad de fármaco liberada y aumenta la eficacia con la que este llega a cierta zona de la herida», apunta Paula Hammond, química del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Esta precisión supone un gran avance con respecto a la estrategia clásica de inundar zonas enteras del cuerpo con medicamentos, de los cuales solo algunos alcanzarán su objetivo.

FALTA DE AIRE

La curación incompleta de heridas causada por una deficiencia de oxígeno afecta cada año a más de seis millones de personas en los EE.UU., y los costes médicos se estiman en 25.000 millones de dólares. Para medir la oxigenación en los tejidos dañados, los médicos usan unas agujas con electrodos que pueden resultar dolorosas para el paciente y solo proporcionan lecturas incompletas de un punto concreto en la herida. El vendaje de Evans, en cambio, aporta información sobre el oxígeno en toda la lesión y de manera inmediata.

El vendaje aparecerá verde si el tejido de la herida está sano y bien oxigenado. De lo contrario, se observarán partes de color amarillo que cambiarán después al naranja y, finalmente, al color de alarma, el rojo intenso

La técnica emplea dos tintes mezclados en un vendaje líquido de secado rápido que puede aplicarse sobre las heridas. Una breve exposición a una luz azul hace que ambos tintes se iluminen, uno en rojo intenso y el otro en verde. A continuación, las moléculas de oxígeno irán disminuyendo la fluorescencia del tinte rojo, así que el vendaje aparecerá verde si el tejido adyacente está sano y bien oxigenado. Pero si algunas zonas están poco oxigenadas, se observarán en el vendaje partes de color amarillo, que cambiarán después al naranja y finalmente al color de alarma, el rojo intenso.

La explicación química de ese sistema se basa en una modificación nanométrica de las moléculas del tinte rojo. Evans añadió a cada una de ellas un dendrímero, una molécula con forma arborescente de hasta dos nanómetros de diámetro. Esta estructura ramificada evita que las moléculas del colorante se entrelacen y supriman sus fluorescencias respectivas. También ejerce un bloqueo físico y consigue que solo algunas moléculas de oxígeno alcancen el tinte. De esta manera, al partir de niveles bajos de oxígeno, los cambios pequeños son fácilmente detectables.

En el hospital, cuando una enfermera vea el color rojo en el vendaje, sacará una fotografía para que los médicos evalúen el estado de la herida y puedan mejorar la circulación sanguínea y la oxigenación en los puntos más afectados. En principio, este vendaje podría usarse también en casa, comenta Evans. Los pacientes podrían tomar sus propias fotos del vendaje y enviarlas a su médico para obtener un diagnóstico.

El equipo de Evans también ha generado otros tintes que convierten la luz azul en roja con mucha mayor eficacia. «Nuestro nuevo vendaje es tan brillante que puede verse aunque se utilice muy poco tinte, incluso en una habitación soleada», asegura Evans. En el futuro, también podría emplearse para dispensar fármacos directamente en las heridas, añade.

UN APÓSITO QUE ADMINISTRA FÁRMACOS

El laboratorio de Hammond ha creado unos vendajes con sustancias terapéuticas producidas mediante nanoingeniería. Ha desarrollado recubrimientos que liberan lentamente proteínas o ARN, moléculas que anularán las actividades celulares que obstaculicen la curación de la herida. Cierto tipo de ARN, denominado ARN de interferencia pequeño, inhibe los genes que dan lugar a proteínas responsables de la mala curación de las lesiones.

El equipo de Hammond encapsuló algunos de estos ARN dentro de unas carcasas de fosfato cálcico, cada una de unos 200 nanómetros de diámetro. Luego intercalaron las carcasas entre dos capas de un polímero biológico con carga positiva, y después untaron uno de los lados con una arcilla cargada negativamente. Lograron así que los lados opuestos se pegaran. Al apilar 25 de estos «sándwiches» se formó una cubierta de aproximadamente un micrómetro de grosor que colocaron en un vendaje de nailon corriente.

A medida que las enzimas del organismo van descomponiendo las capas de la cubierta, las moléculas de ARN van liberándose en la herida a lo largo de una semana. La descarga progresiva podría reducir los efectos secundarios causados por una dosis

Mark Peplow es periodista científico.

EN SÍNTESIS

Los apósitos pueden transformarse en sistemas precisos de administración de medicamentos mediante la manipulación de materiales del tamaño de unos nanómetros.

La nanotecnología permite intercalar fármacos entre las capas de un vendaje y controlar la cantidad que se desprende de él.

Estos vendajes inteligentes pueden identificar el estado de una herida grave y también liberar moléculas que inhiban las proteínas que retrasan la curación.

En las arterias del corazón pueden colocarse unos dispositivos diminutos con múltiples capas; cuando estas se disuelven, liberan el ADN correspondiente a una proteína que ayuda a reconstruir los vasos sanguíneos dañados.

IMPLANTES INFORMÁTICOS

Electrónica blanda para el corazón

Unos circuitos flexibles cubren órganos vitales sin dañarlos y supervisan su funcionamiento

El material electrónico nunca se ha adaptado muy bien a la carne humana. Los circuitos rígidos no se doblan cuando están adheridos a los órganos y sus bordes duros rasgan el tejido. Este problema ha limitado seriamente los esfuerzos para mejorar el poder computacional y la precisión de dispositivos tales como los catéteres empleados para desobstruir las arterias. El silicio, a pesar de ser la base de toda la industria informática, es muy quebradizo.

Pero incluso los materiales más rígidos pueden volverse flexibles si son lo bastante finos, comenta John Rogers, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Su grupo está construyendo hojas electrónicas flexibles, de apenas 10 nanómetros de grosor, para dispositivos que podrían ser colocados dentro o alrededor de órganos como el corazón y que funcionarían sin causar daño. Rogers se refiere a ellos como «electrónica blanda».

Los circuitos que él construye deben emplear materiales conductores de alta fidelidad, como el silicio o el nitruro de galio, porque deben transmitir las señales digitales sin interferencias. Para evitar la tendencia del silicio a romperse al ser doblado, ha utilizado la nanoingeniería para adelgazar el material al tiempo que mantiene su capacidad conductora. Cuando alcanza un grosor de unos 10 nanómetros, el silicio se comporta más como una goma elástica que como el cristal.

Rogers ya ha ensayado con éxito en animales una membrana flexible que contiene circuitos electrónicos y que puede envolverse alrededor de un corazón para vigilar la aparición de arritmias. Si sigue obteniendo buenos resultados, piensa que podrá incorporar un monitor electrónico a los dispositivos que abren las arterias, como los catéteres con globo, para identificar las secciones más estrechas de los vasos. «Estos dispositivos mecánicos podrían convertirse en unos instrumentos quirúrgicos refinados», concluye.

—Joshua A. Krisch

concentrada de un fármaco clásico, además de asegurar que la herida reciba un tratamiento constante.

Hammond también ha utilizado esta cubierta en capas para administrar una proteína que ayuda a curar las lesiones en ratones diabéticos. Aunque la proteína se halla ya disponible como ungüento, la experta cree que esta preparación no resulta muy eficaz porque, después de liberar una gran cantidad de la molécula, su actividad se desvanece al cabo de unas 24 horas. El vendaje, en cambio, permite un flujo constante entre cinco y siete días y mantiene la dosis óptima de proteína.

La estrategia de las capas podría mejorar los tratamientos de otro tipo de dolencia: la arteriopatía coronaria, causada por la formación de placas en los vasos que irrigan el músculo cardíaco. El tratamiento suele consistir en ensanchar la arteria con un globo inflable y mantenerla abierta insertando un tubo pequeño de acero inoxidable denominado estent. Algunos estents vienen cargados con fármacos para evitar que la arteria vuelva a estrecharse, pero los pacientes suelen tener que medicarse más para reducir el riesgo de que se formen y liberen coágulos de sangre en esa área.

Tratar la arteria con dosis de ADN cuidadosamente liberadas por dispositivos con recubrimientos nanométricos supondría una mejor solución, según David Lynn, químico de la Universidad de Wisconsin-Madison. Dentro de las células del organismo, el ADN estimularía la síntesis de una proteína que ayudaría a estabilizar y reconstruir las paredes del vaso sanguíneo. Para administrar esas terapias génicas en el momento y lugar apropiados, Lynn ha recubierto los estents con capas sucesivas de ADN y un polímero biodegradable, cada una de varios nanómetros de grosor. Al variar el número de capas, los investigadores pueden controlar la cantidad de ADN liberado en las paredes del vaso. Experimentos realizados en cerdos demostraron que el ADN penetraba gradualmente en el tejido circundante varios días después de implantar el estent. Otras pruebas han demostrado que con pequeños retoques en el diseño del recubrimiento puede modificarse la velocidad de liberación. «Con la capacidad de control que poseemos hoy, podemos programar el momento de la administración, desde algunos segundos hasta varios meses, simplemente modificando la estructura del polímero o la manera en la que ensamblamos las capas», explica Lynn.

La nanoingeniería básica de estas invenciones podría adaptarse a una amplia gama de usos. Lynn está utilizando capas de polímero para aplicar unas moléculas biológicas, llamadas péptidos, que interrumpen la comunicación química que establecen las bacterias entre sí. Si las aislamos, las bacterias pierden la capacidad de asociarse y formar biopelículas que las protejan frente a la acción de los antibióticos. Evans, por su parte, está empleando sus tintes fosforescentes en muestras de tejido para identificar células tumorales hipóxicas, ya que estas pueden oponer una especial resistencia a la quimioterapia. Calcula que podrá ensayar esta técnica en animales a finales de año. La estrategia de los tintes podría servir también para identificar bacterias infecciosas en una herida o detectar otro tipo de moléculas. «Las posibilidades son infinitas», predice Evans.

PARA SABER MÁS

Polyelectrolyte multilayers promote stent-mediated delivery of DNA to vascular tissue. Eric M. Saurer y otros en *Biomacromolecules*, vol. 14, n.º 5, págs. 1696-1704, mayo de 2013.

Nanolayered siRNA dressing for sustained localized knockdown. Steven Castleberry en *ACS Nano*, vol. 7, n.º 6, págs. 5251-5261, junio de 2013.

Surface coatings that promote rapid release of peptide-based AgrC inhibitors for attenuation of quorum sensing in *Staphylococcus aureus*. Adam H. Broderick y otros en *Advanced Healthcare Materials*, vol. 3, n.º 1, págs. 97-105, enero de 2014.

Click-assembled, oxygen-sensing nanoconjugates for depth-resolved, near-infrared imaging in a 3D cancer model. Alexander J. Nichols en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 53, n.º 14, págs. 3671-3674, abril de 2014.

Non-invasive transdermal two-dimensional mapping of cutaneous oxygenation with a rapid-drying liquid bandage. Zongxi Li en *Biomedical Optics Express*, vol. 5, n.º 11, págs. 3748-3764, noviembre de 2014.



Larry Greenemeier es editor asociado en *Scientific American*.



LA NANOMEDICINA EN LAS PRÓXIMAS DÉCADAS

NANOBOTS TERAPÉUTICOS

> Superar todas las dificultades técnicas podría llevar veinte años o más, pero ya se han dado los primeros pasos hacia una medicina por control remoto
> *Larry Greenemeier*

La nanomedicina del futuro podría contemplar el desarrollo de minúsculos agentes terapéuticos que naveguen con su propia energía hacia un lugar específico en el cuerpo. Al llegar, estos dispositivos autónomos actuarán de diversas maneras, como liberar su carga medicinal o informar en tiempo real de su progreso en la lucha contra la enfermedad. Una vez cumplida la misión, se degradarán de una manera segura, sin apenas dejar rastro. Estos nanobots estarán fabricados con materiales biocompatibles, metales magnéticos o incluso moléculas de ADN, todos ellos seleccionados por sus propiedades útiles a escala atómica, así como por su capacidad de burlar las defensas del organismo sin causar daño celular.

Aunque tal perspectiva quizá tarde una o dos décadas en cumplirse, los investigadores ya han comenzado a abordar algunos de los problemas técnicos de esas aplicaciones. Uno de los mayores desafíos consiste en garantizar que los nanodispositivos alcancen sus objetivos dentro del cuerpo.

EL PODER DE LAS ONDAS

La mayoría de los fármacos que hay en el mercado son transportados con rapidez a través del organismo por el torrente sanguíneo, bien después de ser inyectados directamente en la sangre, o bien, si se trata de comprimidos, después de ser absorbidos por los vasos del tracto digestivo. Pero estos medicamentos llegan tanto a los lugares donde se necesitan como a aquellos donde pueden causar complicaciones indeseadas. Las nanomedicinas, en cambio, se diseñan para que se dirijan de manera específica a un tumor o a otro lugar donde exista un problema y, una vez allí, liberen su carga, con lo que se reduce el riesgo de efectos secundarios.

Los campos magnéticos y los ultrasonidos son, a corto plazo, los candidatos principales para guiar las nanomedicinas hasta su objetivo, comenta Joseph Wang, catedrático de nanoingeniería y profesor emérito de la Universidad de California en San Diego. Cuando emplean el campo magnético, los investigadores añaden, por ejemplo, nanopartículas de óxido de hierro o níquel a un fármaco. Luego colocan un arsenal de imanes permanentes cerca del ratón o del sujeto en cuestión y, mediante la manipulación de los campos magnéticos, hacen avanzar el fármaco metálico hasta una determinada ubicación del cuerpo. En la estrategia de ultrasonidos, los científicos envían ondas acústicas contra nanoburbujas que llevan una carga medicinal y las hacen esta-

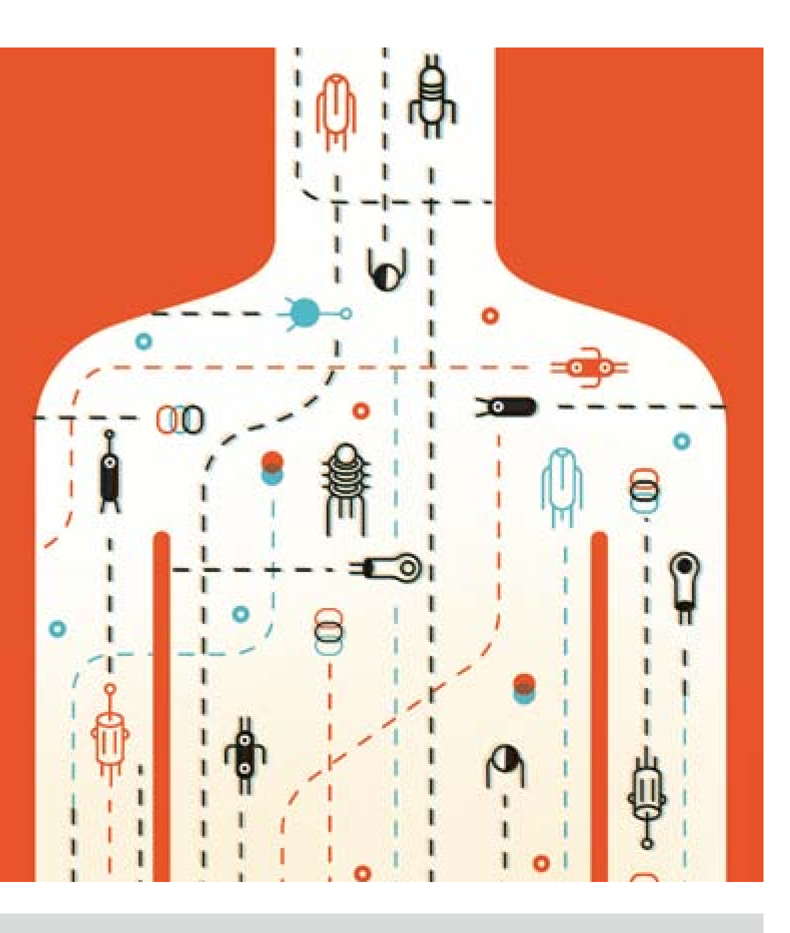
EN SÍNTESIS

Algún día, una flota de nanomedicamentos y de dispositivos viajará dondequiera que se los necesite en el cuerpo, donde llegarán por sí solos mediante motores y combustibles biocompatibles.

Pero antes de que llegue ese día, deberá aprenderse a diseñar estos compuestos de modo que puedan moverse sin dañar o interferir con las funciones biológicas normales.

De momento se está explorando el uso de campos magnéticos y ultrasonidos para guiar las nanopartículas hacia sus objetivos. Pero estas técnicas no permiten acceder en profundidad a los tejidos.

Otra opción consiste en crear nanobots a partir de ADN. Algunos de estos compuestos están diseñados para funcionar como recipientes que se abren y liberan su contenido solo en determinadas circunstancias.



llar con la suficiente fuerza para que su contenido penetre en un tejido o tumor.

El año pasado, investigadores de las universidades de Keele y de Nottingham dieron un nuevo giro al empleo de campos magnéticos con el objetivo de reparar fracturas óseas. Fijaron nanopartículas de óxido de hierro en células madre y después inyectaron la preparación en dos medios experimentales: fémures de fetos de pollo y matriz ósea sintética compuesta por un hidrogel de colágeno obtenido mediante ingeniería tisular. Una vez que las células madre llegaron a la zona de la fractura, se utilizó un campo magnético externo oscilante para modificar la tensión mecánica sobre las nanopartículas, la cual fue transferida a las células madre. Tal tensión las ayudó a diferenciarse en células óseas con mayor eficacia. En ambos casos se formó hueso nuevo, aunque globalmente la curación fue desigual. En un futuro se espera que, al añadir distintos factores de crecimiento a las células madre, mejore el proceso de reparación, comenta James Henstock, investigador posdoctoral en el Instituto para la Ciencia y la Tecnología Médicas, en la Universidad de Keele.

NANOFÁRMACOS AUTÓNOMOS

Las desventajas principales de las estrategias basadas en campos magnéticos y acústicos son la incomodidad de usar una guía externa para dirigir los fármacos a su objetivo y el hecho de que los campos magnéticos y los ultrasonidos solo pueden penetrar en el cuerpo hasta cierto punto. El desarrollo de micromotores autónomos que ayuden a distribuir la carga terapéutica podría ofrecer una solución a estos problemas.

Los micromotores emplearían reacciones químicas para su propulsión, aunque ello conllevaría cierto riesgo de toxicidad. Por ejemplo, la oxidación de la glucosa (un azúcar que se encuentra en la sangre) produciría peróxido de hidrógeno, una molécula que se puede utilizar como combustible. Pero se sabe que esta táctica no funcionaría a largo plazo, porque el peróxido de hidrógeno corroe los tejidos y, además, no hay suficiente glucosa en el cuerpo para generar el peróxido de hidrógeno que se necesita en la propulsión de los micromotores. El uso de otras sustancias naturales como fuente de energía, como el ácido del estómago (para tratamientos en este órgano) o el agua (abundante en la sangre y los tejidos), está obteniendo resultados más prometedores.

Sin embargo, lograr que esos dispositivos autopropulsados se desplacen con precisión puede suponer un obstáculo aún mayor. El hecho de que las nanopartículas puedan moverse libremente no significa que se dirijan exactamente hacia donde uno desea. Dado que la conducción autónoma de estos dispositivos todavía no es posible, una manera de soslayar esta dificultad consistiría en hacer que las nanomedicinas se activaran solo cuando se hallaran en un entorno determinado.

Para lograrlo, se han comenzado a fabricar nanomáquinas a partir de formas sintéticas de ADN. Al ordenar las subunidades de la molécula de modo que sus cargas electrostáticas la fuercen a plegarse en una configuración particular, puede conseguirse que cumplan diversas tareas. Así, algunos segmentos de ADN se doblarán y formarán unos envases que se abrirán y lanzarán su contenido solo cuando el dispositivo detecte una proteína importante en una enfermedad o se encuentre en el ambiente ácido de un tumor, comenta Yamuna Krishnan, catedrática de química de la Universidad de Chicago.

Krishnan y sus colaboradores conciben unas entidades modulares más avanzadas hechas de ADN que puedan programarse para diversas tareas, tales como obtener imágenes o incluso ensamblar otros nanobots. El ADN sintético todavía resulta costoso, unas cien veces más que los materiales tradicionales usados para administrar fármacos. Por tanto, el precio desalienta de momento a las compañías farmacéuticas de invertir en estos tipos de tratamientos, comenta Krishnan.

Todavía nos hallamos lejos de construir una flota de submarinos inteligentes como el Proteus de la película *Viaje alucinante*, de 1966. A pesar de ello, parece que el desarrollo de los nanobots está avanzando en esa dirección.

PARA SABER MÁS

Motion control at the nanoscale. Joseph Wang y Kalayil Manian Manesh en *Small*, vol. 6, n.º 3, págs. 338-345, febrero de 2010.

Designer nucleic acids to probe and program the cell. Yamuna Krishnan y Mark Bathe en *Trends in Cell Biology*, vol. 22, n.º 12, págs. 624-633, diciembre de 2012.

Remotely activated mechanotransduction via magnetic nanoparticles promotes mineralization synergistically with bone morphogenetic protein 2: Applications for injectable cell therapy. James R. Henstock y otros en *Stem Cells Translational Medicine*, vol. 3, n.º 11, págs. 1363-1374, noviembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanotécnica y química. Richard E. Smalley en *IyC*, noviembre de 2001.

Propulsión y conducción de nanorrobots. T. E. Mallouk y A. Sen en *IyC*, julio de 2009.

Fabrizio Pinto investiga en el Laboratorio de Aplicaciones del Vacío Cuántico de la Universidad Jizán, en Arabia Saudí. Antiguo miembro del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, cuenta en su haber con diez patentes por aplicaciones de las fuerzas de dispersión.



NANOTECNOLOGÍA

Máquinas de Van der Waals y de Casimir

Un control adecuado de las fuerzas de corto alcance que actúan entre materiales neutros tal vez permita fabricar nanomáquinas sin rozamiento, nuevos sistemas de propulsión y mejores dispositivos de almacenamiento energético

Fabrizio Pinto

¿Por qué el mundo permanece unido en vez de desmoronarse? Isaac Newton abordaba esta pregunta en el prefacio de su *Philiosophiae naturalis principia mathematica*, publicada en 1687:

> *Pues me veo inducido a sospechar, por muchas razones, que todos ellos [los fenómenos de la naturaleza] dependen de ciertas fuerzas por las cuales las partículas de los cuerpos, debido a causas hasta ahora desconocidas, o bien son impelidas mutuamente unas hacia otras y se agrupan en figuras regulares, o bien se repelen y se separan unas de otras; siendo estas fuerzas desconocidas, hasta hoy los filósofos han intentado en vano la investigación de la naturaleza.*

No fue sino hasta finales del siglo XIX cuando el físico holandés Johannes Diderik van der Waals formuló una explicación convincente del fenómeno, basada en suponer la existencia de fuerzas débiles de corto alcance entre los átomos. La búsqueda prosiguió hasta 1927, año en que Shou Chin Wang, estudiante de doctorado en la Universidad de Columbia, calculó la fuerza entre dos átomos de hidrógeno empleando la recién formulada mecánica cuántica. Dichas interacciones se deben a que, en cada instante, un átomo puede generar un campo eléctrico dipolar. Sus electrones no se distribuyen de manera uniforme alrededor del núcleo, lo que da lugar a una densidad transitoria de carga positiva en un lado del átomo y una negativa en el opuesto. Un átomo cercano interaccionará con esas densidades instantáneas de carga, lo que producirá un campo que se propagará hacia el átomo inicial. En los años treinta, el físico germano-americano Fritz London analizó el fenómeno en su totalidad. Debido a la conexión entre sus estudios y la óptica, London introdujo el término «efecto de dispersión» para referirse al fenómeno, razón por la que estas interacciones se conocen de forma colectiva como fuerzas de dispersión.

Esa atracción entre átomos y moléculas nos proporciona importantes pistas sobre la cohesión de los materiales. Y, aunque hoy se estudia de manera habitual en los cursos de física y química de secundaria, aún desconocemos muchas de sus propiedades; en particular, su potencial para entender y manipular la materia a escala nanométrica.

EN SÍNTESIS

A distancias inferiores a un micrómetro, los materiales experimentan dos tipos de fuerzas atractivas: la de Van der Waals y la de Casimir. La primera se debe a la atracción entre dipolos instantáneos; la segunda, al vacío cuántico.

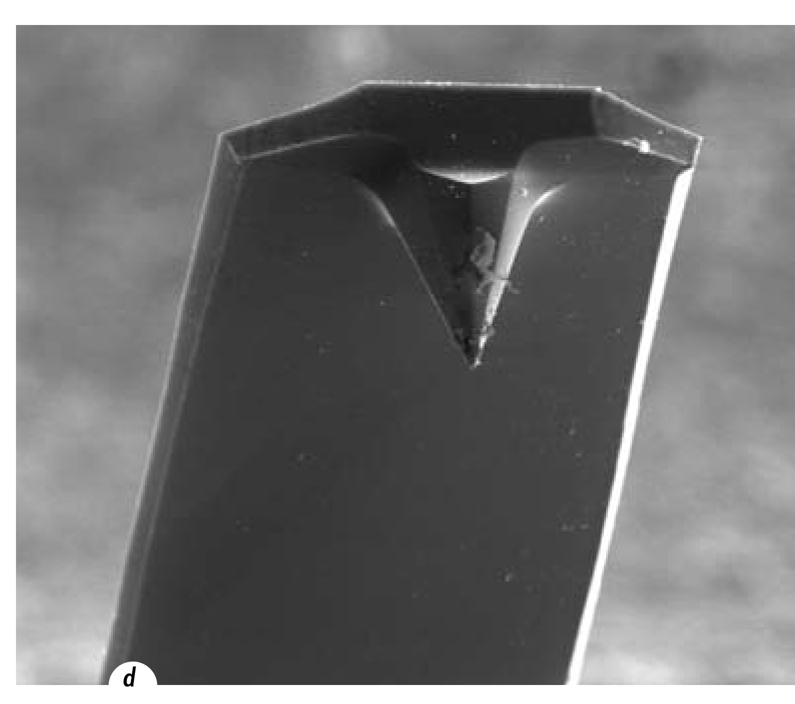
Hasta hace poco se pensaba que dichas fuerzas eran demasiado débiles para aprovecharlas con fines prácticos. En ciertos casos, sin embargo, pueden llegar a dominar el comportamiento de la materia a distancias nanométricas.

Ya existen algunas aplicaciones exitosas, como el microscopio de fuerzas atómicas. Algunos investigadores han comenzado a explorar nuevas posibilidades, como máquinas nanométricas capaces de convertir la energía luminosa en trabajo útil.









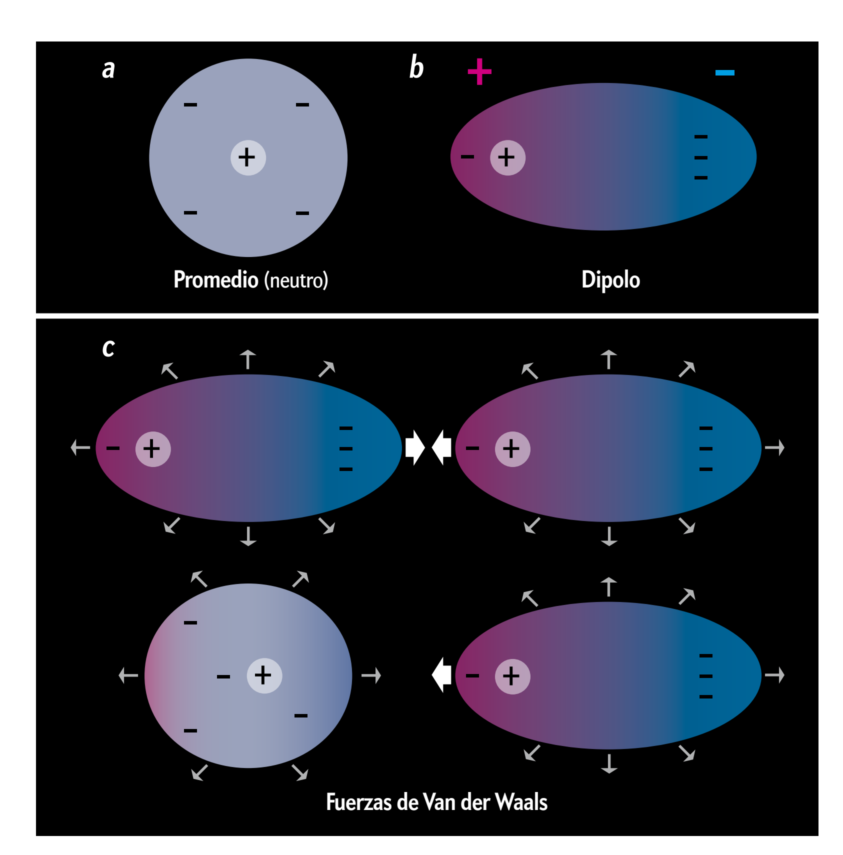
LAS FUERZAS DE VAN DER WAALS son las principales responsables de la atracción entre moléculas polarizadas, como las de agua (*a*). Dichas fuerzas pueden manifestarse también a escala macroscópica: causan la adhesión entre granos de polen (*b*), el agarre a una superficie de las patas de la salamanquesa (*c*) o las interacciones que tienen lugar en la punta de un microscopio de fuerzas atómicas (*d*). Desde hace unos años, algunos investigadores exploran su potencial en aplicaciones de nanotecnología.

Podríamos pensar que el estudio de las fuerzas de dispersión se limita al campo de los sólidos estáticos. Sin embargo, en los últimos años se han concebido varios métodos para controlarlas que alumbran interesantes aplicaciones. La combinación de varias de estas técnicas de vanguardia, entre las que destaca el empleo de nanotubos de carbono, tal vez permita fabricar mecanismos completamente nuevos, como baterías o motores que almacenen y liberen energía a voluntad sin necesidad de combustible químico.

DE LOS ÁTOMOS AL MATERIAL

Aunque las fuerzas de Van der Waals operan en las minúsculas distancias que median entre átomos y moléculas, sus efectos también se manifiestan en el conjunto del material. La expresión deducida por London, hoy conocida como potencial de Van der Waals-London, disminuye con la distancia entre los átomos. Es también proporcional a la libertad de movimiento de los electrones en el interior del átomo, lo que afecta a su polarizabilidad (si los electrones apenas pueden alterar su posición con respecto al campo dipolar de un átomo vecino, responderán con dificultad a las cargas inducidas). Además, London propuso que las fuerzas de dispersión eran aditivas, por lo que la fuerza total entre dos objetos debería venir dada por la suma de las contribuciones de todos los átomos de uno y otro. Tales resultados implicaban que la fuerza de Van der Waals entre dos placas podía calcularse a partir de las propiedades ópticas del material, sin necesidad de conocer sus detalles a escala atómica.

Mas tarde, los experimentos con partículas macroscópicas suspendidas en un medio (coloides) revelaron que el potencial de Van der Waals entre dos de ellas decrecía a grandes dis-



DIPOLOS INSTANTÁNEOS: Aunque un átomo no posea carga neta (*a*), en un instante cualquiera sus electrones pueden distribuirse de manera irregular y dar lugar a dipolo (*b*). A su vez, un dipolo puede inducir la polarización de un átomo cercano (*c*). Esta interacción de corto alcance explica la aparición de fuerzas de Van der Waals entre átomos y moléculas.

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

tancias más rápido de lo que cabía esperar para un agregado de átomos. Esa discrepancia apuntaba a la existencia de un efecto adicional hasta entonces desconocido. Hacia mediados de la década de los cuarenta, los físicos holandeses Hendrik B. G. Casimir y Dirk Polder resolvieron parte del misterio. Años después, Casimir reveló a Peter W. Milonni, por entonces en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, que su idea surgió en 1947 durante una conversación con Niels Bohr en la que este murmuró algo sobre «la energía del punto cero». La novedosa idea de Casimir no se basaba en las propiedades de los átomos, sino en las del mismo vacío.

El principio de incertidumbre de Heisenberg establece que algunos pares de magnitudes, como el momento y la posición de una partícula, no pueden determinarse de manera simultánea con una precisión arbitraria. El mismo principio también se aplica al campo electromagnético. Por ello, incluso cuando el espacio se encuentra «vacío» en términos clásicos (es decir, en su estado de mínima energía) existen vibraciones aleatorias del campo electromagnético. Ello implica que debemos visualizar el vacío cuántico como un mar de fotones virtuales que aparecen y desaparecen sin cesar.

Al aproximar dos placas conductoras, las vibraciones del vacío en la zona interior no pueden tener una longitud de onda superior a la distancia que media entre las placas. Sin embargo, en la región exterior a las placas existen vibraciones con una longitud de onda mayor. El resultado neto es una fuerza que tiende a juntar las placas, por más que estas sean neutras y no debiese aparecer entre ellas ninguna fuerza atractiva. Hoy este fenómeno se conoce como efecto Casimir.

La atracción entre las placas se encuentra vinculada a las fuerzas de dispersión a escala atómica, ya que guarda una estrecha relación con la interacción entre los pares de dipolos fluctuantes. En numerosos casos, en torno a un 80 por ciento de la fuerza de Casimir entre dos placas puede calcularse a partir de la interacción entre pares de átomos, uno en cada placa, y sumando después las contribuciones de todos los átomos en ambas placas.

La teoría de Casimir demostró que, a largas distancias, las fuerzas de dispersión decrecen con mayor rapidez si el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia entre las placas resulta considerablemente mayor que el tiempo típico de las transiciones atómicas. Dicha situación, que recibe el nombre de «régimen retardado», contrasta con el análisis de las fuerzas de Van der Waals realizado por London, correspondiente al régimen sin retardo.

EN BUSCA DE PRUEBAS

Desde el hallazgo de Casimir, varios equipos de investigación han intentado obtener manifestaciones tangibles de su teoría. En 1955, Evgeni M. Lifshitz desarrolló una síntesis magistral en su teoría sobre las fuerzas de dispersión, formulada desde un punto de vista puramente macroscópico en el que no era necesario considerar la aditividad de las fuerzas.

La atracción entre dos placas neutras ha suscitado comentarios apasionados. El premio nóbel Julian Schwinger y sus colaboradores llegaron a describirla como «una de las consecuencias menos intuitivas de la electrodinámica cuántica». Esta visión casi mística contrasta con la demostración obtenida en 1988 por Milonni y otros investigadores, quienes, siguiendo una sugerencia del también premio nóbel Peter Debye, hallaron que la fuerza de Casimir podía explicarse como la diferencia entre la presión de radiación ejercida por los fotones virtuales de la zona exterior a las placas y los contenidos en su interior.

Los efectos de la luz sobre las fuerzas de Casimir abren la puerta a emplear estas últimas en ciclos de trabajo análogos al de una máquina de vapor

La descripción anterior ha sugerido la posibilidad de abandonar el formalismo de la electrodinámica cuántica y postular la existencia de un campo electromagnético aleatorio clásico en ausencia de fuentes. Esta teoría, conocida como «electrodinámica estocástica», ha sido empleada por Timothy H. Boyer, de la Uni-

versidad de la Ciudad de Nueva York, y otros colaboradores para deducir el efecto Casimir sin referencia explícita a la cuantización. La electrodinámica estocástica cuenta en su haber con varias demostraciones matemáticas similares, si bien sus implicaciones físicas han sido criticadas y la mayoría de los físicos no creen que pueda reemplazar a la electrodinámica cuántica.

En cualquier caso, la interpretación de la fuerza de Casimir en términos de presión de radiación sentó las bases de una serie de experimentos efectuados a partir de 1997 por Andrés Larraza, de la Escuela Naval de Postgraduados de California, y sus colaboradores. En ellos, el campo aleatorio no es electromagnético, sino acústico, producido por generadores de ruido y motores de compresión en el interior de una cámara cerrada. Su espectro de potencias solo se encuentra definido para una banda de frecuencias finita, lo que da lugar a una fuerza de Casimir acústica que, en lugar de disminuir con la distancia conforme una ley de potencias, oscila en función de la separación entre las placas e incluso se torna repulsiva en ciertos intervalos.

Otras modificaciones similares de la fuerza «tradicional» de Casimir, en las que las frecuencias del punto cero se limitan a una banda estrecha, fueron concebidas en 1991 por Charles Adler y Nabil Lawandy, por entonces en la Universidad Brown, y en 1993 por Enrico Iacopini, de la Universidad de Florencia, y Lawrence H. Ford, de Tufts. Estas propuestas teóricas predicen, para el caso electromagnético, violentas oscilaciones de la fuerza de Casimir, grandes aumentos de intensidad y cambios en su signo, si bien han suscitado un vivo debate sobre la posibilidad de que violen el principio de causalidad.

Aunque las disputas teóricas y experimentales continúan, las fuerzas de dispersión ya han encontrado aplicaciones en varias áreas. Por el momento, la de mayor éxito probablemente sea el microscopio de fuerzas atómicas, desarrollado en los años ochenta. A diferencia de un microscopio óptico, estos dispositivos cuentan con un diminuto voladizo flexible que, unido a una sonda muy afilada —con una punta de tamaño nanométrico—, palpa una superficie y consigue resolver su topografía a escala atómica. Las fuerzas de dispersión entre la punta de la sonda y la superficie deforman el voladizo, lo que genera una señal que se convierte en imágenes.

Cada vez con mayor frecuencia, el voladizo y la sonda se fabrican con sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés). Estos recurren a las técnicas de fabricación de microchips para integrar componentes electrónicos, sensores e incluso partes móviles en dispositivos de escala micrométrica. Las fuerzas de Van der Waals siempre han desempeñado un papel clave en los MEMS, ya que, a tales distancias, predominan sobre la gravedad e incluso sobre las fuerzas electrostáticas. En particular, causan serias limitaciones debido la fricción estática (*stiction*) que generan.

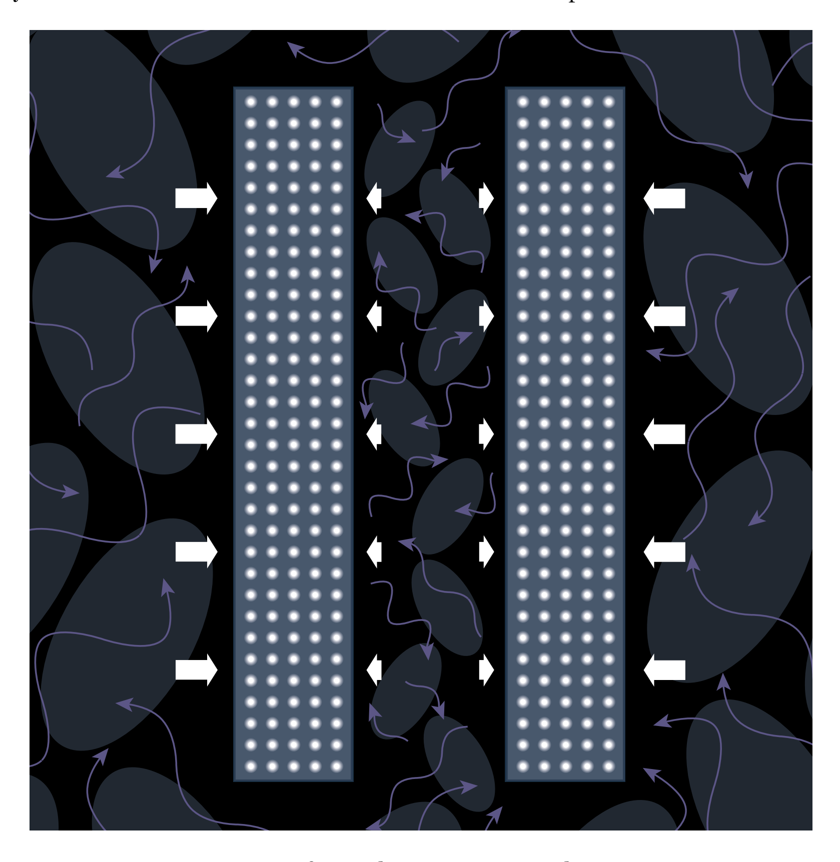
Como señaló Richard Feynman en su conferencia clásica «Hay mucho sitio al fondo», impartida en 1959, las fuerzas de Van der Waals resultan tan intensas a escala micrométrica que todo tiende a permanecer unido, «como en las viejas películas en que un hombre con las manos llenas de melaza intenta soltar un vaso de agua». Durante la última década, varios investigadores han explorado distintos métodos para aprovechar dichas fuerzas y producir trabajo mecánico en MEMS. Si, tal y como halló el grupo de Larraza en el caso acústico, fuese posible generar fuerzas de Casimir repulsivas, ello permitiría superar los inconvenientes causados por la fricción estática en estos dispositivos.

UN PEQUEÑO GRAN EFECTO

Mi interés por las fuerzas de dispersión se ha centrado en la posibilidad de aprovechar los intercambios energéticos en ciclos de trabajo («termodinámicos») basados en dichas interacciones. Si las fuerzas de dispersión pueden dominar el comportamiento de la materia a escala nanométrica, como anticipó Feynman, su efecto colectivo tal vez encierre un gran potencial tecnológico.

No obstante, a finales de los años noventa no pude encontrar mención alguna a las fuerzas de Van der Waals en dicho contexto. En las publicaciones de física, la fuerza de Casimir se describía siempre como insignificante, posiblemente debido a la valoración original del propio Casimir, quien calificó el efecto de «diminuto».

Uno de los primeros estudios que cuestionó ese punto de vista fue el realizado en 1995 por F. Michael Serry, Dirk Walliser y G. Jordan Maclay, a la sazón en la Universidad de Illinois. Hoy citado con frecuencia, dicho trabajo demostró que las fuerzas de Casimir convertirían un oscilador de tipo MEMS en un sistema



EFECTO CASIMIR: Otra fuente de atracción entre objetos neutros muy próximos es el efecto Casimir, el cual se debe a las propiedades del vacío cuántico. Al acercar dos placas conductoras, el espacio que media entre ellas no podrá acoger fotones virtuales cuya longitud de onda asociada (*flechas ondulantes*) sea mayor que la distancia entre las placas. Dado que en la región exterior existen fotones virtuales de todas las longitudes de onda, el efecto neto es una presión de radiación neta (*flechas gruesas*) que tiende a juntar las placas.

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

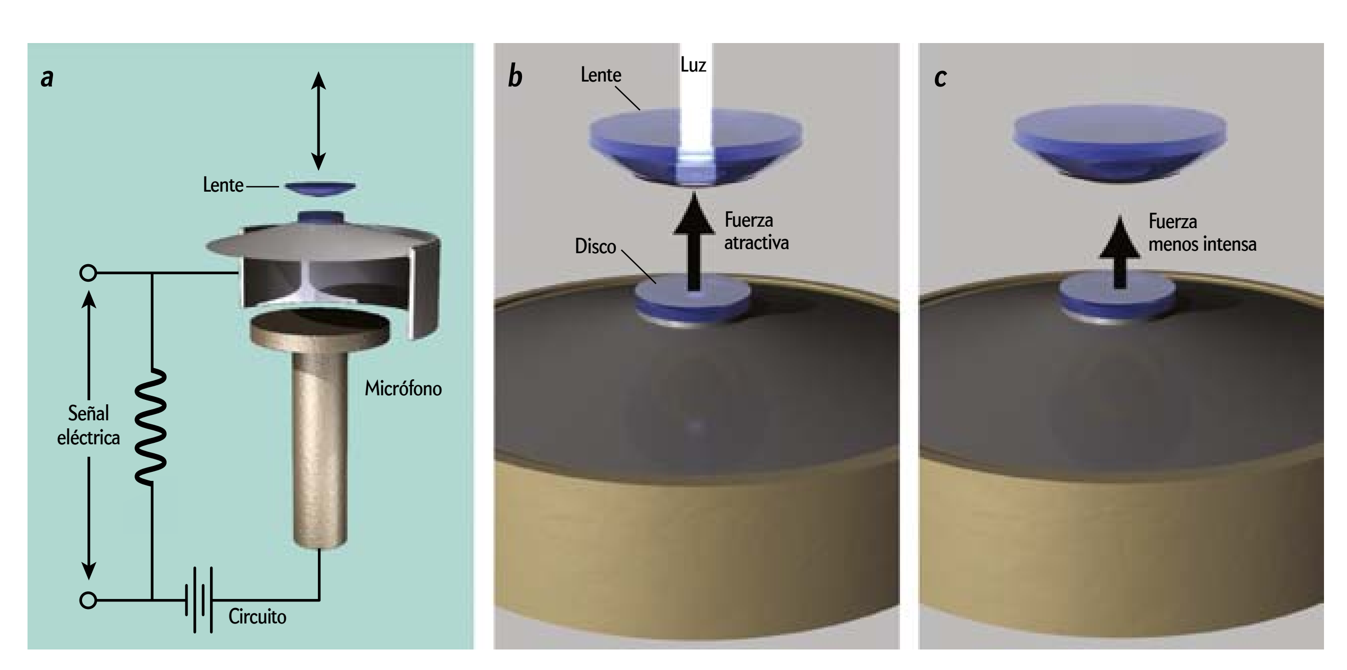
altamente no lineal, o anarmónico. Los investigadores vaticinaron que, una vez que tales efectos se comprendiesen en profundidad, debería ser posible aprovecharlos con fines prácticos. Esa predicción motivó en parte mi línea de investigación. A pesar de todo, el mito de una fuerza de Casimir «débil» no se esfumó. En 2001, un artículo del *New York Times* sobre la primera demostración experimental de la fuerza de Casimir en dispositivos de tipo MEMS, llevada a cabo en los Laboratorios Bell por el grupo de Federico Capasso, se titulaba: «Una diminuta fuerza de la naturaleza, mayor de lo que se pensaba».

Entre los años 2000 y 2002, Kellar Autumn, de la Universidad Lewis y Clark, y sus colaboradores demostraron que la capacidad para trepar de las salamanquesas podía explicarse a partir de la adhesión en seco por fuerzas de Van der Waals [*véase* «Interacciones que pegan», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; Investigación y Ciencia, noviembre de 2004]. El mismo principio ha dado lugar a la aparición de pegamentos fabricados con métodos propios de la nanotecnología. Así pues, en apenas unos años las fuerzas de dispersión pasaron de ser consideradas insignificantes a convertirse en protagonistas de afirmaciones como que, en un caso ideal, los millones de vellosidades de la pata de una salamanquesa «permitirían sostener el peso de dos personas de tamaño medio».

Aunque el reconocimiento del potencial de las fuerzas de dispersión en nanotecnología es relativamente reciente, el hito que, en mi opinión, hizo que las fuerzas de Van der Waals comenzasen su lenta andadura hacia el ámbito de las aplicaciones se produjo hace más de cuarenta años. Dicho avance fue el método de detección dinámica de fuerzas de Van der Waals desarrollado en 1969 como parte de la tesis doctoral de Siegfried Hunklinger, de la Universidad Técnica de Múnich, y descrito por él y otros colaboradores en *Review of Scientific Instruments* en 1972.

Su experimento consistía en hacer vibrar un micrófono en el vacío (es decir, en ausencia de sonido) por medio de una lente convexa que, conectada a un diafragma de altavoz y situada a un micrómetro, oscilaba a la frecuencia de resonancia del micrófono. Dicho montaje no buscaba demostrar el intercambio de energía, sino medir la fuerza de Van der Waals entre la lente y la membrana del micrófono. Sin embargo, en cierto sentido iba más allá del oscilador anarmónico de Casimir que, años después, analizarían Maclay y sus colaboradores. Este último es conservativo (no se añade ni se quita energía neta al sistema), las fuerzas de rozamiento resultan insignificantes y la fuerza de Casimir no modifica la energía total del sistema. En cambio, el experimento de Hunklinger demostró que las fuerzas de Van der Waals podían realizar un trabajo mecánico sobre un objeto macroscópico. Una parte de dicho trabajo se transforma en energía eléctrica. Por supuesto, la energía eléctrica aparece porque, a diferencia del oscilador de Maclay, el sistema de detección no es conservativo, sino que está accionado por el altavoz vibrante y la lente, los cuales cuentan con su propia fuente de energía externa.

Entre 1983 y 1984, el físico, inventor y escritor de ciencia ficción Robert L. Forward propuso emplear las fuerzas de dispersión para generar corriente eléctrica. En uno de sus dispositivos teóricos, varias placas conductoras paralelas se unen con cables y son dotadas de una pequeña carga eléctrica por medio de una fuente de voltaje. La repulsión electrostática tenderá a separarlas, mientras que la fuerza de Casimir entre láminas adyacentes las atraerá. Aunque este sistema es inherentemente



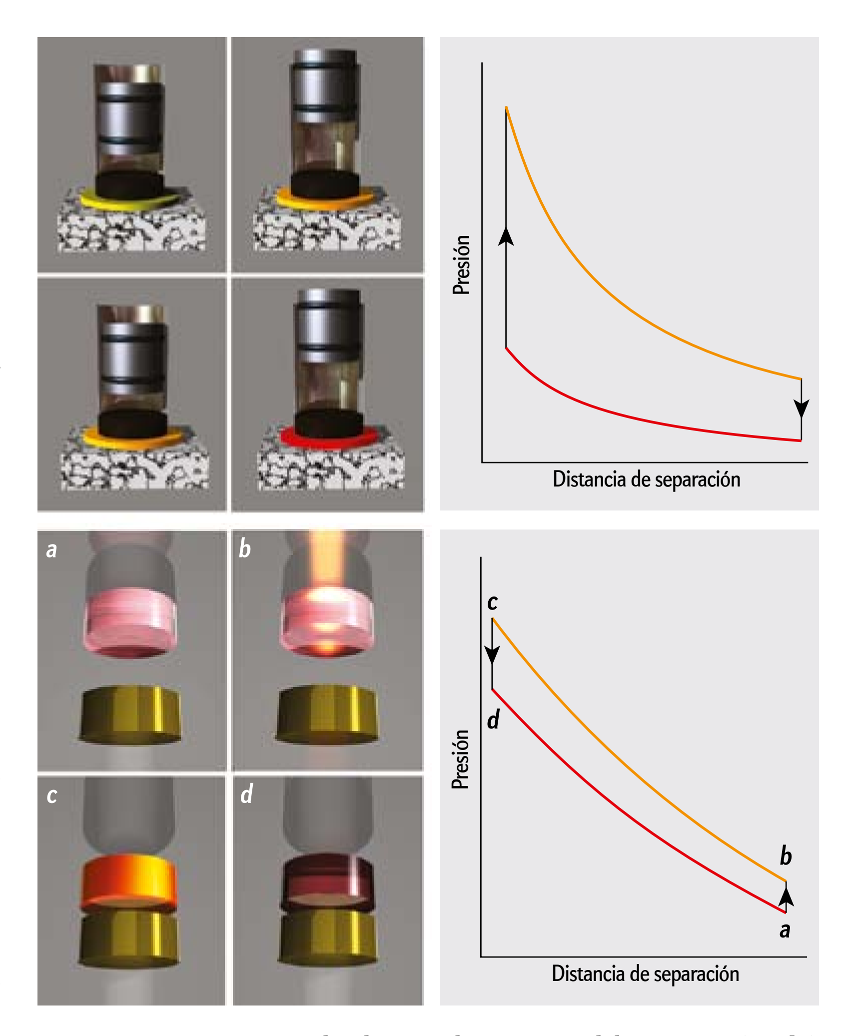
EFECTOS MACROSCÓPICOS: **En 1972, un experimento realizado por Siegfried Hunklinger y otros investigadores de la Universidad Técnica de Múnich demostró que las fuerzas de Van der Waals podían realizar trabajo mecánico sobre objetos macroscópicos. En el montaje original (*a*) se hace oscilar una lente convexa mediante su unión a un diafragma de altavoz (*no mostrado*). La lente se halla muy próxima a un pequeño disco unido a la membrana de un micrófono. Dado que las fuerzas de Van der Waals dependen de la distancia, las oscilaciones de la lente producen una fuerza variable, lo que genera una señal eléctrica en el micrófono aunque este se encuentre en el vacío; es decir, incluso en ausencia de sonido. En un experimento posterior, la lente se recubre con silicio, un material semiconductor cuya conductividad cambia cuando se hace incidir sobre él luz de la longitud de onda adecuada. Dado que la fuerza de atracción entre dos placas depende de sus propiedades conductoras, la señal eléctrica producida por el micrófono es mayor con iluminación (*b*) que en la oscuridad (*c*).**

inestable, una de las contribuciones más perdurables de Forward fue proponer su uso como «batería de fluctuaciones del vacío», en la que una parte de la energía potencial entre las superficies se convierte en energía eléctrica.

En los últimos años, he reconsiderado la posibilidad de almacenar energía en el campo de una fuerza de dispersión abordando las serias limitaciones de los sugerentes pero poco prácticos dispositivos de Forward. Tales intentos me han llevado a explorar las propiedades de los nanotubos de carbono de paredes múltiples. Por un lado, porque su área específica (el área de superficie disponible para la interacción por unidad de masa) resulta mucho mayor que en una geometría basada en planos paralelos; por otro, porque su separación típica es muy inferior al micrómetro. Se ha estimado que el área específica de los nanotubos de carbono alcanza valores de hasta dos millones de metros cuadrados por kilogramo, mientras que la distancia entre las envolturas se limita a unos 0,34 nanómetros.

La idea consiste en que la corteza interior de un nanotubo de doble pared se desplace hacia arriba y hacia abajo, de forma parecida al pistón de un motor, para producir energía o realizar trabajo. En principio, las envolturas no tienen por qué estar formadas por átomos de carbono, ya que otros materiales generan fuerzas de Casimir más intensas. Una estimación de los órdenes de magnitud implicados indica que, en conjuntos densos de nanotubos de doble pared paralelos, la densidad de energía de Van der Waals puede alcanzar valores de hasta 300 vatios hora por kilogramo. Ello supone un avance considerable sobre las baterías electroquímicas comunes, que almacenan del orden de entre 10 y 100 vatios hora por kilogramo.

Las baterías electroquímicas adolecen de un límite intrínseco en la densidad de energía que pueden almacenar. Las fuerzas de Casimir, en cambio, tal vez permitan superar con creces dicha cota. Un aumento de un factor 20 en la densidad de energía permitiría que un automóvil eléctrico cruzase EE.UU. de costa a costa con una sola recarga. También posibilitaría fabricar paneles solares que no solo conviertan la luz en electricidad, sino que almacenen energía durante toda la noche o hasta el siguiente día soleado. Además, los dispositivos nanométricos basados en fuerzas de Van der Waals podrían ceder energía mucho más rápido que las baterías e incluso que los supercondensadores actuales, lo que facultaría el almacenamiento y la liberación de alta potencia mediante sistemas considerablemente mejores que los disponibles hoy en día.



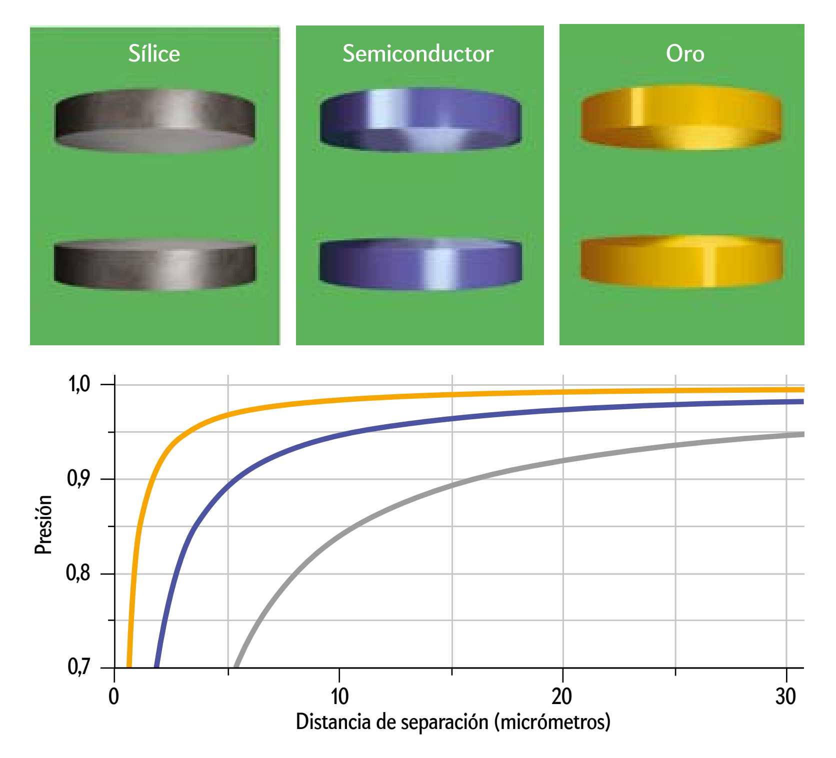
CICLOS DE TRABAJO: El ciclo termodinámico usual de un motor (*arriba*) emplea combustible para impulsar un pistón y generar trabajo mecánico. Un montaje análogo permite obtener trabajo mecánico gracias la energía de una fuente de luz externa y la acción de las fuerzas de Casimir entre dos cuerpos (*abajo*); aquí se muestra la interacción entre dos placas cilíndricas: una cuyas propiedades se mantienen constantes a lo largo de todo el ciclo (*inferior, dorada*) y otra recubierta con un semiconductor (*superior*), lo que permite controlar su conductividad por medio de un rayo luminoso. El ciclo comienza con ambas placas separadas y en su estado de menor energía (*a*). Al iluminar el semiconductor (*b*), este experimenta una transición hacia un estado de energía mayor; ello incrementa la fuerza de Casimir entre ambas placas y genera trabajo mecánico (*c*). Por último, el sistema cede el exceso de energía y regresa a su estado fundamental (*d*). Los gráficos adjuntos muestran el valor de la presión mecánica (*arriba*) y de Casimir (*abajo*) en función de la distancia de separación de los elementos durante el ciclo termodinámico.

LUZ Y FUERZAS DE DISPERSIÓN

En su artículo original, Forward se preguntaba si las fuerzas de dispersión serían conservativas; es decir, si el trabajo que realizan en un ciclo cerrado siempre suma cero. La posibilidad de una respuesta negativa le preocupaba: «Es muy probable que [el campo de fluctuaciones del vacío] sea conservativo, ya que de lo contrario podrían diseñarse máquinas basadas en la fuerza de Casimir que extrajesen del vacío una cantidad infinita de energía». Dicho resultado violaría el principio de conservación de la energía, al permitir la obtención de una cantidad ilimitada de energía sin coste alguno. Aunque muy razonable, este argumento se enuncia a menudo de manera acrítica. Por ejemplo, el artículo del *New York Times* sobre el efecto Casimir sentenciaba: «No obstante, el efecto no puede aprovecharse como fuente continua de energía, ya que para separar las placas ha de invertirse tanta energía como la que se obtiene al juntarlas».

En 1979, Hunklinger y otros investigadores publicaron en *Physical Review B* un trabajo que demostraba cómo sortear tal

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE (*gráficas*)



PORTADORES DE CARGA: La fuerza de Casimir depende de la cantidad de portadores de carga que puedan circular libremente por el material. Un dieléctrico, como el sílice (*gris*), experimenta una fuerza menor que un semiconductor dopado (*azul*). Ambos se ven superados por un metal como el oro (*amarillo*), cuyas propiedades se aproximan a las de un conductor ideal.

objeción. En el que a mi juicio constituye uno de los experimentos de física más relevantes del siglo XX por sus implicaciones para el almacenamiento y la conversión de energía, los autores ampliaron sus investigaciones previas sobre las fuerzas de Van der Waals para incluir los efectos de la luz. Su idea se basaba en que, en un semiconductor, los portadores de carga pueden pasar de la banda de valencia a la de conducción cuando la muestra se ilumina con la longitud de onda apropiada. Ello altera la «función dieléctrica» del material, que describe sus propiedades ópticas y determina sus fuerzas de dispersión. Su estudio estaba respaldado por la teoría de Lifshitz, la cual establecía que, al aumentar la conductividad del material, las fuerzas de dispersión deberían intensificarse.

A fin de verificar experimentalmente dicha predicción, los investigadores recubrieron con silicio amorfo la punta de la lente unida al diafragma de altavoz. A continuación, iluminaron el conjunto con la luz blanca de una lámpara de wolframio. La lente se hallaba muy próxima a un pequeño disco de sílice unido a la membrana del micrófono. Al accionar el diafragma, el micrófono respondía con una fuerza periódica que era notablemente mayor con luz que en la oscuridad.

Con todo, los resultados experimentales no acababan de concordar en todos sus detalles con las predicciones de la teoría de Lifshitz. Las razones para ello siguen siendo hoy objeto de debate. Algunos investigadores han subrayado las limitaciones debidas al uso de un aislante (el vidrio) como elemento sensor. Por mi parte, he investigado las suposiciones que afectan a la calibración electrostática del micrófono. En todo caso, el análisis de las discrepancias en los experimentos relacionados con la fuerza de Casimir ha dado lugar a una fértil área de investigación.

En el caso de los semiconductores, tal vez haya motivos para perfeccionar la teoría actual. Aunque hoy sabemos que la luz puede modular la fuerza de Casimir que actúa sobre estos materiales, hacen falta nuevos experimentos que consoliden los análisis teóricos basados en la electrodinámica cuántica. Con este fin, Umar Mohideen y su grupo de la Universidad de California en Riverside han desarrollado un nuevo método que, con ayuda de microscopios de fuerzas atómicas modificados, permite estudiar las fuerzas de Casimir y su dependencia con las condiciones experimentales.

NUEVAS NANOMÁQUINAS

En 1998, me percaté de que los efectos de la luz sobre las fuerzas de dispersión abrían la puerta a emplear estas últimas en ciclos de trabajo análogos al de una máquina de vapor. Si los efectos de un nanomotor semejante pudiesen ampliarse hasta una escala macroscópica, tal vez fuese posible accionar o incluso propulsar instrumentos tan grandes como un satélite. En la actualidad, estamos investigando cómo aprovechar las fuerzas de dispersión para construir todo tipo de dispositivos, desde nanorrobots quirúrgicos que actúen en el interior del cuerpo humano hasta sistemas de propulsión y almacenamiento de energía, tanto en tierra firme como en el espacio.

Consideremos un ciclo en el que dos superficies semiconductoras se aproximan mientras son iluminadas, lo que aumenta la fuerza de dispersión, y después se separan en la oscuridad, cuando esta es menor. En tal caso, el trabajo neto realizado por la fuerza de dispersión será distinto de cero. Hemos de enfatizar que ello no significa que estemos extrayendo energía neta del vacío, ya que todo cambio en la función dieléctrica de un material requiere un aporte energético, como el proporcionado por la lámpara de wolframio en el experimento de Hunklinger. Con todo, que la energía total se conserve no impide que un ciclo pueda realizar trabajo, siempre y cuando este sea igual a la energía intercambiada con un foco de calor externo.

Mi motivación para abordar el problema era doble. Por un lado, la fabricación de nanomáquinas útiles requerirá concebir estrategias completamente nuevas para accionarlas, así como para almacenar y liberar energía. Por otro, el experimento de Hunklinger sobre los efectos de la luz en las fuerzas de Van der Waals podía considerarse como un ejemplo particular de un campo más amplio, al que podríamos llamar «ingeniería de fuerzas de dispersión». Para explorar esta posibilidad, en 1999 concebí un experimento mental consistente en sustituir las placas habituales del efecto Casimir por placas semiconductoras. El estudio detallado de un ciclo mecánico demostró la posibilidad de recargar una batería realizando trabajo sobre las placas de un condensador, de modo que parte de la energía de la radiación podía convertirse en energía electrostática.

En 2003, la posibilidad de controlar la fuerza de Casimir mediante irradiación fue analizada numéricamente por Norio Inui, del Instituto Himeji de Tecnología de Japón, quien estudió los efectos del espesor finito de la placa, la difusión de portadores y la evolución temporal del fenómeno. En un trabajo de 2013, demostré que esa modulación luminosa de la fuerza de Casimir

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE (gráficos)

podía ayudar a resolver un problema que, desde hacía tiempo, se sabía que aparecería al fabricar nanotubos de carbono de paredes múltiples que operasen como osciladores, actuadores y sensores.

Dicho inconveniente se debe a que no resulta nada sencillo conseguir que el nanotubo interior, a menudo llamado «lanzadera», comience a moverse con respecto a la pared externa. Propuse que semejante dificultad podía sortearse si se explotaba el hecho de que las propiedades ópticas de un nanotubo están dominadas por los excitones, pares electrón-hueco ligados a la superficie curva de los nanotubos. Tal y como demostraron experimentalmente Chunlei Yang y sus colaboradores, por entonces en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong, al iluminar un nanotubo con un láser, se genera un «gas» de cargas libres en la pared. Ello afecta al espectro de los excitones y a la reflectividad del nanotubo.

En 2004, Raul Esquivel-Sirvent y sus colaboradores en la Universidad Nacional Autónoma de México demostraron que, en un semiconductor voluminoso, los excitones apenas modifican la fuerza de Casimir. En un nanotubo, sin embargo, la simple iluminación parcial de la pared exterior puede generar una fuerza de dispersión sobre la lanzadera capaz de superar la fricción estática. Una aplicación escalonada de este mecanismo reduciría de manera considerable el rozamiento, lo que permitiría mantener las oscilaciones de la lanzadera.

Por otro lado, Vesselin N. Shanov, Mark J. Schulz y su grupo de la Universidad de Cincinnati han demostrado la posibilidad de fabricar nanotubos de más de un centímetro de longitud. Gracias a ello, el proceso de aceleración podría repetirse a lo largo de miles de etapas y conseguir velocidades de expulsión de la lanzadera de entre 10 y 100 kilómetros por segundo. A partir de este principio, he propuesto un acelerador no electromagnético de partículas nanométricas neutras que, si pudiese ampliarse de un único nanotubo a un conjunto denso de ellos, tal vez serviría como propulsor nanométrico de altas prestaciones para aplicaciones espaciales. Las lanzaderas de nanotubos podrían dispararse a altas velocidades a fin de propulsar un pequeño satélite u otro instrumento sin necesidad de almacenar combustible químico.

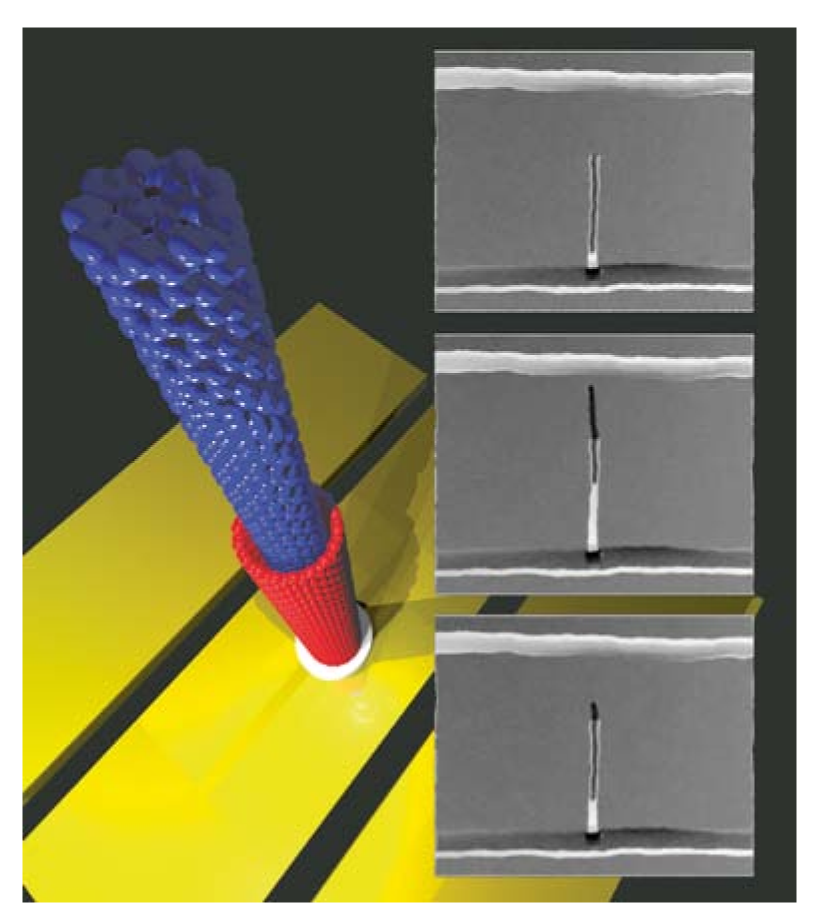
NADA ES GRATIS

Como hace poco afirmaba el investigador de la Universidad Yale Steven Lamoreaux en un artículo de revisión, las fuerzas de Casimir «siguen sorprendiéndonos después de 60 años». En mi caso, el estupor llegó con mi experimento mental de 1999, que en un primer momento parecía sugerir la posibilidad de extraer una cantidad infinita de energía del vacío. A esta provocativa conclusión se llega si suponemos que, en un ciclo de trabajo, la energía luminosa requerida para excitar los portadores de carga a la banda de conducción es igual a la energía liberada cuando estos regresan a la banda de valencia. Ello implica que, a diferencia de lo que ocurre con el trabajo mecánico, la energía neta intercambiada en cada ciclo por todos los focos térmicos externos será cero, en clara violación de la primera ley de la termodinámica.

En un trabajo de 2001, Marco Scandurra, por entonces en la Universidad de Pisa, propuso un análisis que condujo a la que parece ser la única solución posible; es decir, a la conservación de la energía en el sistema semiconductor. «Por supuesto, el trabajo necesario para recombinar los electrones con los átomos resulta mayor cuando la distancia entre las placas es pequeña, y presumiblemente igual a la energía total liberada por el vacío durante la fase de compresión», sentenciaba el investigador.

La conclusión de Scandurra me parece satisfactoria. En estos momentos, estoy estudiando varios sistemas concretos a fin de determinar, más allá de la presunción, si la energía liberada al final del ciclo coincide con el trabajo neto realizado por las fuerzas de dispersión en el formalismo de la electrodinámica cuántica, la electrodinámica estocástica y los campos acústicos.

Aún quedan otras cuestiones por aclarar, como la generalización de la teoría de Lifshitz a geometrías más realistas que el sistema habitual con dos placas, como la superficie de los granos de polen o de células biológicas. Se espera que las fuerzas de dispersión resulten muy complejas en tales geometrías rugosas y que en algunos casos se tornen incluso repulsivas. Modificar a voluntad el signo de las fuerzas de Casimir supondría un gran



PISTONES NANOMÉTRICOS: Los nanotubos de carbono de pared doble (*izquierda*) se postulan como excelentes candidatos para fabricar pistones de escala nanométrica basados en las fuerzas de dispersión. En principio, una iluminación adecuada permitiría controlar la fuerza atractiva entre ambos nanotubos. En la simulación reproducida aquí (*derecha*), un electrodo situado sobre el dispositivo hace que el tubo interior salga disparado hacia fuera; después, las fuerzas de dispersión lo atraen de nuevo hacia el interior.

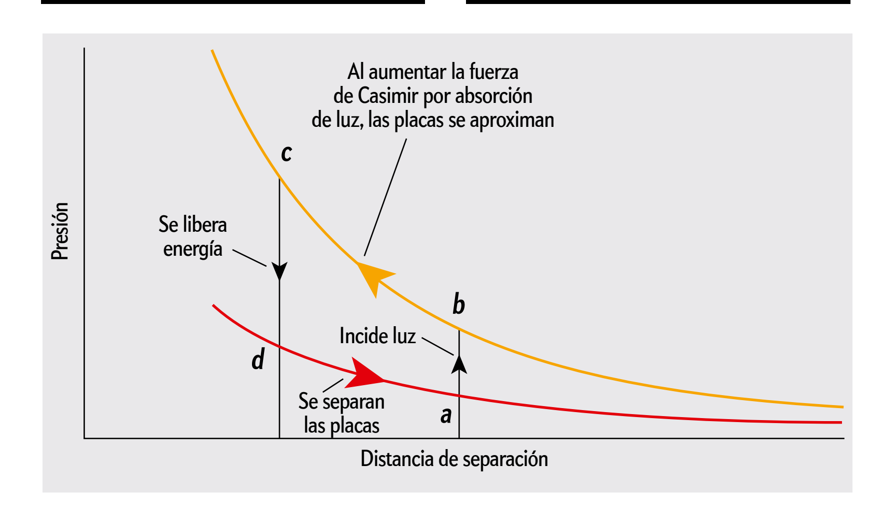
avance para el desarrollo de dispositivos de tipo MEMS, ya que permitiría superar la fricción estática. En 2009, las investigaciones de Capasso, Jeremy N. Munday y V. Adrian Parsegian demostraron que, en ciertos casos, la fuerza de Casimir podría hacerse repulsiva si la región entre las superficies se llenase de una sustancia con las propiedades ópticas apropiadas.

Otro gran desafío radica en la dificultad para calcular la fuerza de Casimir entre dos objetos irregulares. En general, un sistema así solo puede aproximarse por medio de un retículo discreto, por lo que no permite obtener soluciones continuas. En 2007, Alejandro Rodríguez, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores lograron un avance sustancial al demostrar que dicha tarea podía llevarse a cabo con algunos de los métodos numéricos empleados en electromagnetismo. En 2009 estudié con detalle la convergencia de su método hacia soluciones conocidas. Para ello, adapté un procedimiento ideado por Yih-Peng Chiou, Yen-Chung Chaing y Hung-Chung Chang, de la Universidad Nacional de Taiwán, a fin de demostrar que era posible obtener una solución numérica sin necesidad de calcular todos los puntos del retículo. Ello aumenta la precisión de la técnica sin sobrecargar los recursos de cálculo por encima de las posibilidades actuales. Aunque conozcamos el origen físico del fenómeno, necesitamos soluciones numéricas precisas para predecir el comportamiento de tales sistemas.

INGENIERÍA DEL VACÍO

Otra atractiva área de investigación corresponde al estudio de las fuerzas de dispersión en presencia de la gravedad. En 2002, Enrico Calloni, de la Universidad Federico II de Nápoles, y otros investigadores hallaron que, en un campo gravitatorio como el terrestre, la energía de Casimir contribuiría con un efecto repulsivo (opuesto a la aceleración de la gravedad). De manera intuitiva, este resultado puede entenderse a partir de la equivalencia entre masa y energía, $E = mc^2$, y el hecho de que la energía de Casimir es negativa.

En la práctica, dado que el equivalente negativo de la energía de Casimir en un sistema de dos placas típico es menor que la masa de un protón, y que las placas ya cuentan con su propia masa (positiva), esa disminución efectiva de la masa gravitatoria resulta extremadamente difícil de detectar. Sin embargo, los gravímetros atómicos pueden medir cambios en el campo gravitatorio que afectan a un átomo, así como alcanzar sensibilidades relativas del orden de 10^{-13}. Por esa razón, he propuesto detectar el equivalente en masa gravitatoria de la energía de Van der Waals entre átomos individuales confinados en trampas frías, un objetivo que puede demostrarse al alcance de la técnica actual.



MÁQUINAS DE CASIMIR: Este ciclo hipotético muestra de manera cualitativa cómo aprovechar las fuerzas de dispersión para realizar trabajo útil. Dos placas paralelas en reposo (*1*) son iluminadas (*2*; *de a a b en la gráfica*), lo que suministra la energía necesaria para acercarlas y elevar una carga (*3*; *b-c*). Al cesar la iluminación, el sistema libera la energía sobrante (*4*) y el ciclo vuelve a su punto de partida (*d-a*). La gráfica inferior muestra la presión de Casimir en función de la separación de las placas durante el ciclo termodinámico.

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

Dicha disminución de masa gravitatoria podría incrementarse en varios órdenes de magnitud si los átomos estuviesen excitados hasta sus «estados de Rydberg», configuraciones muy energéticas en las que la distancia de un electrón al núcleo supera con creces el radio típico del estado fundamental (unos 100 picómetros), llegando en algunos casos a alcanzar tamaños de unos 100 nanómetros, similares al de un virus. En tales condiciones un átomo es sumamente frágil, por lo que un campo externo puede deformarlo con mucha mayor facilidad. Ello implica un aumento notable de su polarizabilidad y, con ello, mejores perspectivas para observar dicho efecto gravitacional.

Hace poco se ha hallado una curiosa relación entre las fuerzas de Casimir en campos gravitatorios y los metamateriales, estructuras artificiales muy estudiadas debido a sus aplicaciones potenciales, como los «mantos de invisibilidad» [*véase* «El antiimán», por Àlvar Sánchez, Carles Navau y Jordi Prat; Investigación y Ciencia, mayo de 2013]. Los metamateriales pueden usarse para replicar las fuerzas de Casimir en campos gravitatorios inaccesibles en el laboratorio, como el de un agujero negro, ya que su respuesta óptica queda descrita por funciones dieléctricas que, desde un punto de vista formal, equivalen a las que aparecerían en un campo gravitatorio.

En 2011, esa posibilidad llevó a Tian-Ming Zhao y Rong-Xin Miao, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, a sugerir que, al llevar a la práctica el método de la restricción de frecuencias con metamateriales, la fuerza de Casimir podría verse aumentada en un insólito factor de 10^{11}. No sorprende que los autores especulasen con la posibilidad de que los experimentos en este campo permitan algún día emplear la energía del vacío con fines prácticos.

En su libro de 1981 *Física de partículas e introducción a la teoría cuántica de campos*, el premio nóbel Tsung-Dao Lee mencionaba una idea fascinante: «El método experimental para alterar las propiedades del vacío podría llamarse "ingeniería del vacío" [...] Si efectivamente pudiésemos alterar el vacío, dado que este se encuentra presente en todo momento y lugar, nuestro mundo microscópico de partículas elementales quedaría indisolublemente unido al mundo macroscópico del cosmos».

Hoy por hoy, el reto principal al que se enfrenta esta incipiente ingeniería cuántica reside en aplicar ciencia de vanguardia al desarrollo de productos que mejoren nuestra calidad de la vida y que sobrevivan a la dura realidad del mercado nanotecnológico. Estamos aprendiendo a explotar las fuerzas de dispersión para construir y controlar, en palabras de Lee, «formas nuevas e indudablemente hermosas».

PARA SABER MÁS

A dynamic method for measuring the van der Waals forces between macroscopic bodies. S. Hunklinger, H. Geisselmann y W. Arnold en *Review of Scientific Instruments*, vol. 43, n.º 4, 1972.

Extracting electrical energy from the vacuum by cohesion of charged foliated conductors. R. L. Forward en *Physical Review B*, vol. 30, págs. 1700-1702, 1984.

Engine cycle of an optically controlled vacuum energy transfer. F. Pinto en *Physical Review B*, vol. 60, págs. 14.740-14.755, 1999.

Thermodynamic properties of the quantum vacuum. M. Scandurra en **arxiv.org/abs/hep-th/0104127, 2001**

Casimir forces: Still surprising after 60 years. S. K. Lamoreaux en *Physics Today*, vol. 60, págs. 40-45, 2007.

Energy storage from dispersion forces in nanotubes. F. Pinto en *Nanotube Superfiber Materials: Changing Engineering Design*, dirigido por M. J. Schulz, V. N. Shanov y Z. Yin. Elsevier, Nueva York, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

El efecto Casimir. Emilio Elizalde en *IyC*, marzo de 2009.



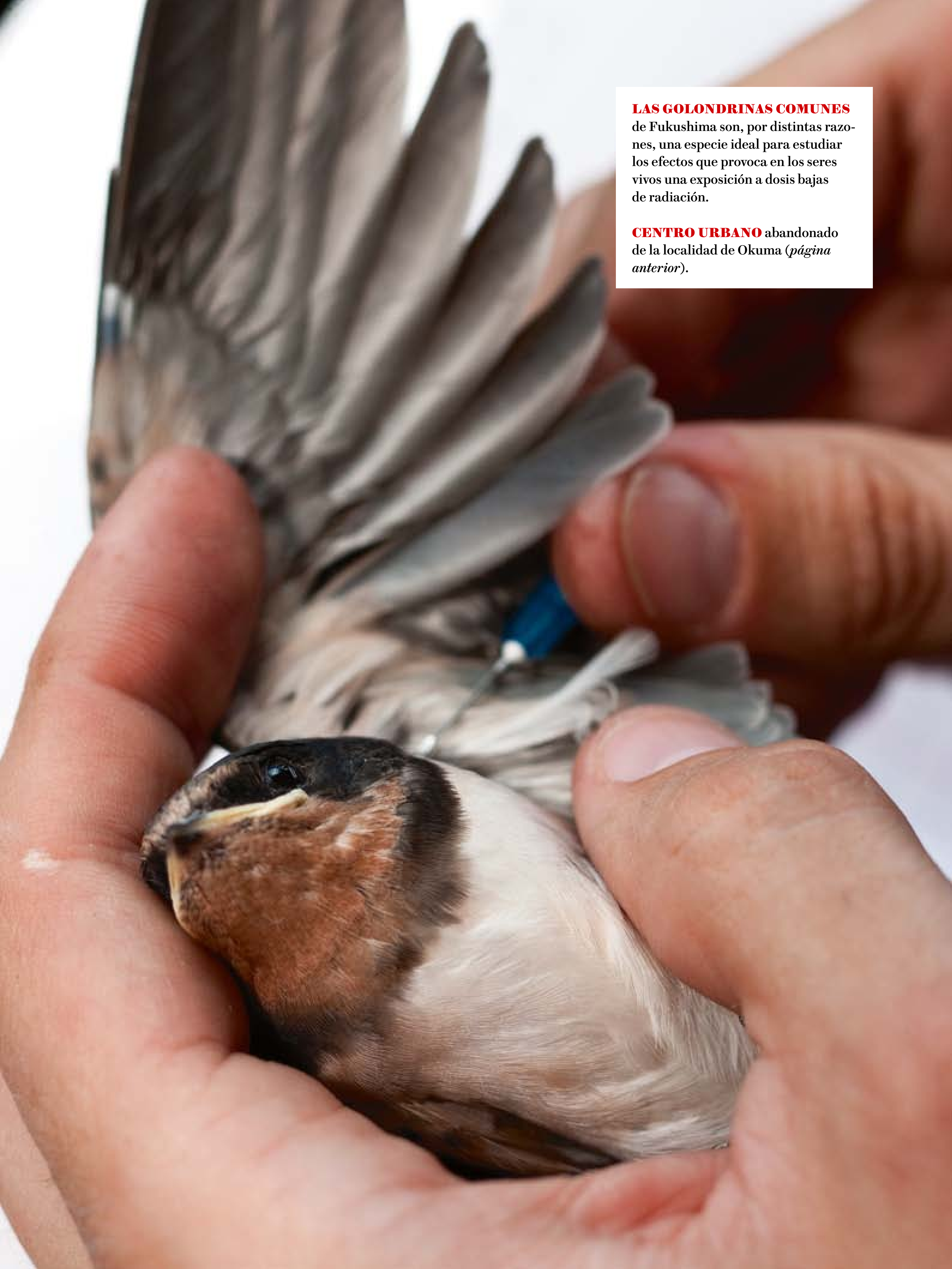
RADIACTIVIDAD

El impacto ecológico de la catástrofe de Fukushima

Aún se sabe muy poco sobre los efectos de la radiación de baja intensidad en los seres vivos y los ecosistemas. Cuatro años después del accidente nuclear, los especialistas comienzan a obtener respuestas

Steven Featherstone





LAS GOLONDRINAS COMUNES de Fukushima son, por distintas razones, una especie ideal para estudiar los efectos que provoca en los seres vivos una exposición a dosis bajas de radiación.

CENTRO URBANO abandonado de la localidad de Okuma (*página anterior*).



Steven Featherstone es periodista y fotógrafo.

En 1986, la explosión de un reactor nuclear en Chernóbil esparció por el hemisferio boreal una lluvia radiactiva equivalente a 400 bombas de Hiroshima. Hasta entonces, los científicos ignoraban casi todo sobre los efectos de la radiación en la fauna y la flora. La catástrofe creó un laboratorio viviente; sobre todo, en los más de 2800 kilómetros cuadrados más próximos a la central, conocidos como zona de exclusión.

Ocho años después, los catedráticos de biología de la Universidad Politécnica de Texas Ronald Chesser y Robert Baker fueron de los primeros científicos estadounidenses que lograron un acceso completo a la zona. «Era un lugar espeluznante; realmente radiactivo», recuerda Baker. «Pero, cuando capturamos un puñado de topillos, vimos que parecían tan sanos como la maleza. Aquello nos dejó estupefactos.» Al secuenciar el ADN de los roedores, los expertos no hallaron tasas de mutación anormales. También vieron lobos, linces y otras especies antaño raras, las cuales vagaban por la zona como si de una reserva atómica se tratase. Veinte años después de la catástrofe, el Fórum de Chernóbil, fundado en 2003 por un grupo de agencias de la ONU, publicó un informe que refrendaba dicha opinión. El documento afirmaba que las condiciones ambientales habían ejercido un «impacto positivo» en la biota de la zona, transformándola en un «santuario de biodiversidad único».

Sin embargo, un lustro después de que Baker y Chesser peinasen la zona en busca de topillos, Timothy A. Mousseau visitó Chernóbil para censar aves y halló indicios de lo contrario. Mousseau, catedrático de biología de la Universidad de Carolina del Sur, y Anders Pape Møller, hoy director de investigación en el Laboratorio de Ecología, Sistemática y Evolución de la Universidad de París-Sur, estudiaron la situación de *Hirundo rustica*, la golondrina común. Hallaron muchas menos en la zona, y las que encontraron tenían una menor esperanza de vida, una fertilidad reducida (en machos), un cerebro más pequeño, tumores, albinismo parcial (un tipo de mutación genética) y una mayor incidencia de cataratas. En más de 60 artículos publicados durante los últimos 13 años, Mousseau y Møller han defendido que la exposición a dosis bajas de radiación ha repercutido de forma negativa en toda la biosfera de la región, de los microorganismos a los mamíferos y de los insectos a las aves.

El trabajo de Mousseau y Møller no está exento de críticas. Entre ellas, las de Baker y Chesser, quienes, en un artículo publicado en 2006 en *American Scientist*, argumentaban que la zona se había convertido a todos los efectos en una reserva, y que las «increíbles conclusiones» de Mousseau y Møller solo se apoyaban en «indicios circunstanciales». No obstante, tanto su investigación como las conclusiones del debate sobre los efectos de la radiación en dosis bajas podrían obligar a replantearlo todo, desde la manera de afrontar las catástrofes nucleares hasta la política nuclear en su conjunto.

Casi todo lo que se sabe acerca de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud procede del Estudio de Esperanza de Vida (LSS, por sus siglas en inglés), una investigación aún en curso sobre los supervivientes de la bomba atómica. Las normas de seguridad relativas a la exposición a la radiación se basan en el LSS. Pero dicho estudio deja sin responder importantes cuestiones sobre qué ocurre con la exposición a dosis bajas de radiación, las condiciones que imperan en Chernóbil. La mayoría de los especialistas coinciden en que no existe ninguna cantidad de radiación «segura», por pequeña que sea. Y las consecuencias de una exposición leve son las menos conocidas. El LSS no dice gran cosa sobre dosis inferiores a los 100 milisieverts (mSv, unidad que mide la energía absorbida por unidad de masa de tejido vivo) y nada en absoluto sobre los ecosistemas radiactivos. ¿Cuánta radiación hace falta recibir para sufrir mutaciones genéticas? ¿Son heredables dichas mutaciones? ¿Cuáles son los mecanismos y los biomarcadores genéticos de las enfermedades causadas por la radiactividad, como el cáncer?

La triple fusión del núcleo de la central Fukushima Daiichi, acaecida en marzo de 2011, creó otro laboratorio viviente. Ello ha permitido a Mousseau y Møller estudiar los efectos de la radiación de baja intensidad y reproducir la investigación llevada a cabo en Chernóbil. Mousseau explica que ahora pueden afirmar con mucha mayor confianza que los efectos observados se encuentran vinculados a la radiación, no a otros factores. La zona de exclusión de Fukushima es, con sus 800 kilómetros cuadrados, menos extensa que la de Chernóbil, pero idéntica en otros aspectos. Ambas albergan bosques, campos de labranza y espacios urbanos abandonados en los que el nivel de radiación puede llegar a variar órdenes de magnitud en distancias cortas. Además, los investigadores consiguieron acceder a Fukushima mucho antes que al Chernóbil de la era soviética. Por todo ello,

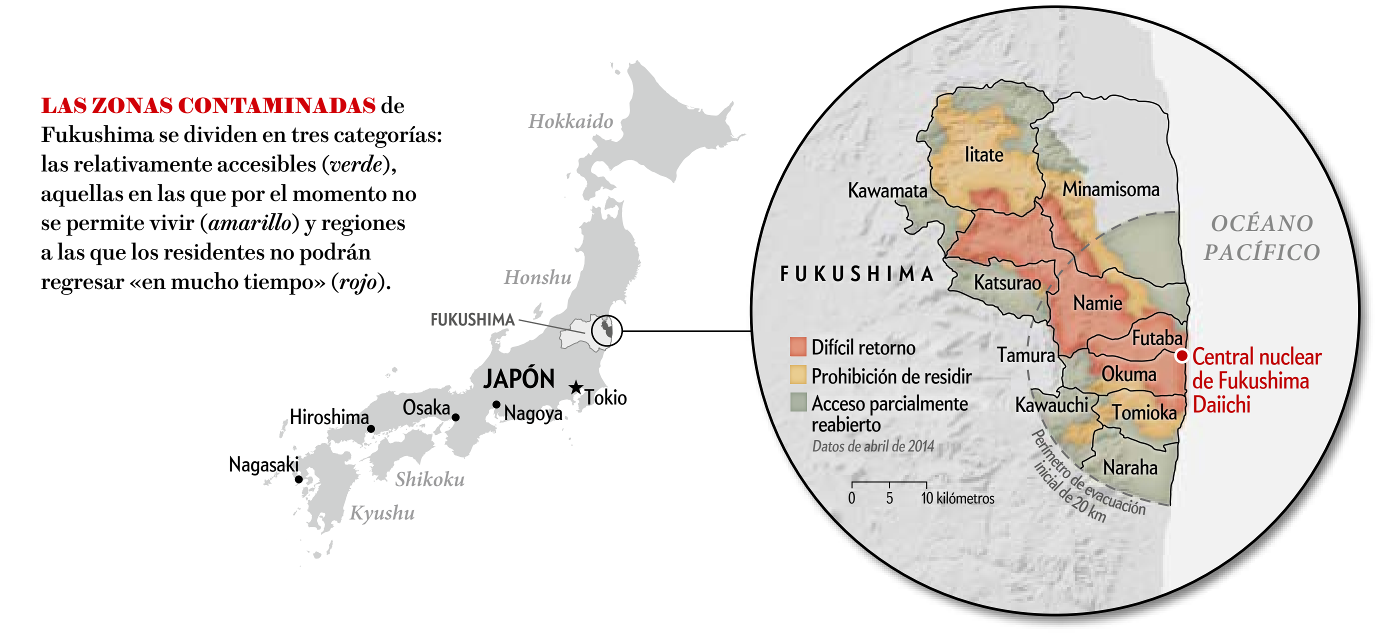
EN SÍNTESIS

Casi tres décadas después del desastre nuclear de Chernóbil, varios estudios parecen indicar que la fauna y la flora de la región se han recuperado sorprendentemente bien.

Con todo, esa conclusión está basada en muy pocos datos. Aún existe un gran desconocimiento sobre los efectos que provoca en los seres vivos una exposición a dosis bajas de radiación.

La fusión del reactor de Fukushima Daiichi, hace cuatro años, ha brindado una nueva oportunidad para estudiar la cuestión. Los primeros resultados revelan daños en la biota de la zona.

LAS ZONAS CONTAMINADAS de Fukushima se dividen en tres categorías: las relativamente accesibles (*verde*), aquellas en las que por el momento no se permite vivir (*amarillo*) y regiones a las que los residentes no podrán regresar «en mucho tiempo» (*rojo*).



la catástrofe japonesa brindaba una oportunidad única para zanjar el debate.

Meses después del accidente, ambos expertos ya estaban censando aves en los bosques contaminados de las montañas situadas al oeste de la central, si bien el acceso a las proximidades de las instalaciones seguía vetado. En junio de 2013, Mousseau fue uno de los primeros científicos en conseguir pleno acceso a la zona de exclusión.

La sensibilidad a la radiación varía enormemente tanto de una especie a otra como entre los individuos de una misma especie, por lo que los datos referentes a las mariposas no pueden extrapolarse a las golondrinas, ni los de los topillos a los humanos. Las mariposas resultan especialmente sensibles, explica Mousseau. En agosto de 2012, la revista *Scientific Reports* publicó un trabajo que examinaba los efectos de la lluvia radiactiva de Fukushima en la mariposa licénida *Zizeeria maha*. Joji Otaki, catedrático de biología de la Universidad de las Ryukyus, y sus colaboradores encontraron que las mariposas capturadas cerca de Fukushima dos meses después del desastre sufrían malformaciones en las alas, las patas y los ojos. Aunque los estudios entomológicos de Mousseau y Møller en Chernóbil y Fukushima ya habían revelado un declive de las mariposas en su conjunto, el artículo de Otaki dio una importante vuelta de tuerca al asunto: al cruzar mariposas mutantes de Fukushima con ejemplares sanos criados en el laboratorio, la tasa de anomalías genéticas aumentó en cada nueva generación. El trabajo de Otaki ha aportado la primera prueba rigurosa de una acumulación intergeneracional de mutaciones genéticas en una especie procedente de Fukushima.

Mousseau opina que esa acumulación de mutaciones constituye un fenómeno latente que merma la salud de los ecosistemas radiactivos y que, en ocasiones, aflora en la descendencia de mariposas mutantes o en las golondrinas con albinismo parcial. Incluso Baker respalda las conclusiones de Otaki: «Sin duda, la radiación está afectando a las mariposas. La exposición durante múltiples generaciones provoca la alteración del genoma».

Antes de reservar su vuelo a Tokio, Mousseau intentó localizar un suministrador nipón de ladrillos de plomo para una nueva serie de experimentos. No pudo encontrar bastantes en Japón, pero se las compuso para desembarcar en el aeropuerto tokiota con 270 kilos de ladrillos embutidos en ocho maletas. En el aeropuerto me reuní con él y su colaborador posdoctoral, Andrea Bonisoli Alquati, y los ayudé a introducir el abultado equipaje en el maletero de un coche de alquiler. Después nos dirigimos a un hotel en Minamisoma, al norte de la central de Fukushima.

El vehículo traqueteaba sobre carreteras que, levantadas por el temblor, serpenteaban entre pueblos deshabitados. Mientras conducía, Mousseau escrutaba las fachadas de las tiendas y casas abandonadas en busca de nidos de golondrina. Las golondrinas comunes constituyen especímenes de estudio ideales debido a su filopatría; es decir, a que suelen regresar a los mismos lugares para reproducirse. Además, se sabe mucho sobre ellas en condiciones normales y comparten características genéticas, fisiológicas y de desarrollo con otros vertebrados homeotermos. Mousseau contó una docena de restos de nidos, manchas de barro con forma de media luna adheridas bajo los aleros de los tejados, pero ningún nido nuevo. «Esto refleja los efectos negativos del primer año», señaló. «Ya me imaginé que sería muy difícil encontrar alguno.»

Unos kilómetros al oeste de la central llegamos al límite de la zona de exclusión: una barricada custodiada por dos policías que, sorprendidos, agitaban los brazos y nos gritaban a través de sus máscaras que diésemos media vuelta. Los permisos para entrar en la zona aún no habían sido validados, por lo que Mousseau hubo de hacerles caso.

«No puedo creer que no haya ningún nido ocupado», dijo en el camino de regreso. Levantó la vista hacia una solitaria lavandera posada en un cable de teléfono. «No he visto ninguna mariposa. Ni libélulas. Verdaderamente se trata de una zona muerta.»

Fukushima ofrece una instantánea única de la respuesta inicial de un ecosistema a la contaminación radiactiva. Poco se sabe sobre las generaciones de topillos y golondrinas de Chernóbil, por no mencionar otros animales. Algunos informes anecdóticos han denunciado una gran mortandad de plantas y animales, pero no hay detalles sobre su recuperación. ¿Han aumentado algunas especies su capacidad para reparar el ADN dañado por la radiación? Estudiar el ecosistema de Fukushima en estos mo-

FUENTE: SAFECAST (BLOG.SAFECAST.ORG); XNR PRODUCTIONS (*mapa*)


1



mentos resulta esencial para diseñar modelos que expliquen cómo cambia la adaptación a la radiación de baja intensidad y cómo evoluciona la acumulación del daño genético.

Mousseau se lamentaba de no haber podido acceder a la zona justo después del accidente. «Ahora dispondríamos de datos mucho más rigurosos sobre el número de golondrinas que había y cuántas desaparecieron», dijo al llegar al hotel. «¿Gozan de un genotipo más resistente las que están regresando, o solo han sido afortunadas?»

Al día siguiente, con los permisos ya validados, los agentes de policía daban paso al vehículo a medida que atravesábamos las barreras de la zona de exclusión. Mousseau se dirigió sin rodeos hacia los accesos a la central. Había pensado seguir la llanura costera, desde la zona cero hasta los pueblos abandonados de Futaba, Okuma y Namie, y, en el camino, contar cada golondrina, cartografiar la ubicación de cada nido y capturar tantos ejemplares como fuese posible.

A un par de kilómetros de la central, Bonisoli Alquati divisó una golondrina posada en un cable cerca de una casa. Un nido de barro fresco colgaba de un saliente dentro del garaje. Los niveles de radiación alcanzaban los 330 microsieverts por hora, más de 3000 veces el nivel de radiación natural y el mayor que Mousseau había registrado jamás en el campo.

«En diez horas tendrás tu dosis anual», me advirtió Bonisoli Alquati, refiriéndose a la cantidad de radiación natural que el estadounidense medio recibe en un año. Él y Wataru Kitamura, miembro del departamento de estudios ambientales de la Universidad de la Ciudad de Tokio, tendieron redes japonesas —parecidas a grandes redes de voleibol de malla de nailon— para cubrir la entrada del garaje. Aguardaron largo tiempo, esperando que la golondrina cayera en ellas. Pero Mousseau no quería perder más tiempo con un solo ejemplar por más que viviese en un lugar tan radiactivo, de modo que acabaron por retirar las redes y dirigirse a Futaba.

Futaba es un pueblo fantasma, vetado a cualquiera salvo a los antiguos residentes, que pueden regresar unas horas al mes para controlar sus viviendas y comercios. En un cartel del centro comercial podía leerse: «Energía nuclear: Un brillante futuro energético». Los niveles de radiación en la calle principal no eran peores que en muchas áreas contaminadas situadas fuera de la zona prohibida. Pero la radiación no representa el único problema de Futaba. El seísmo, de magnitud 9, dejó pocos edificios indemnes. Buena parte de ellos se inclinaron sobre sus cimientos; otros se desplomaron por completo. Bajamos la calle, aplastando tejas y cristales rotos a nuestro paso. Las ratas y los cuervos rebuscaban entre las pilas de basura y en la comida putrefacta de las estanterías de los comercios. Con ayuda de unos prismáticos, Kitamura contó seis golondrinas que revoloteaban cerca de una tienda de deportes hecha trizas, tras lo cual ordenó preparar las redes.

Kitamura y Bonisoli Alquati se dirigieron en cuclillas hacia el exterior del establecimiento, cada uno sujetando un extremo de la red. Tras revolotear sobre sus cabezas, un par de golondrinas se lanzaron en picado al interior del local. Los hombres se incorporaron de un salto y extendieron la red sobre la entrada, lo que dejó a las aves atrapadas en el interior. Tardaron dos horas en capturar las seis y tomarles muestras. Antes de liberarlas, Mousseau les colocó unos diminutos dosímetros termoluminiscentes, a fin de controlar la cantidad de radiación que recibirían. En la estación de tren, donde el nivel de radiactividad alcanzaba un valor diez veces más elevado, apresaron dos más.

Aquella noche el grupo cenó en Minamisoma. Todo el mundo estaba exhausto. Le pregunté a Kitamura qué sentía después de haber visto la zona con sus propios ojos. «Una especie de tristeza, porque nada ha cambiado desde el día del accidente», confesó. Afligido por lo que había visto en Futaba, el investigador no mostraba ningunas ganas de regresar.

Al principio, el Gobierno nipón prometió que en marzo de 2014 se habrían descontaminado los once municipios más afectados de la prefectura de Fukushima. El objetivo era reducir la dosis anual a 1 mSv, el límite fijado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica para la población general. Hasta ahora, sin embargo, los esfuerzos se han centrado en estabilizar los reactores dañados, que continúan vertiendo radiactividad en el Pacífico. Las autoridades ya no prometen ninguna fecha





UN POLICÍA inspecciona los permisos y los pasaportes para entrar en la zona restringida de Fukushima (*1*). Bicicletas abandonadas en una calle dañada de Futaba (*2*). Mujeres de Futaba aguardan mientras unos parientes inspeccionan lo que fue su pescadería (*3*). Cafetería asolada por el maremoto en la zona restringida (*4*).



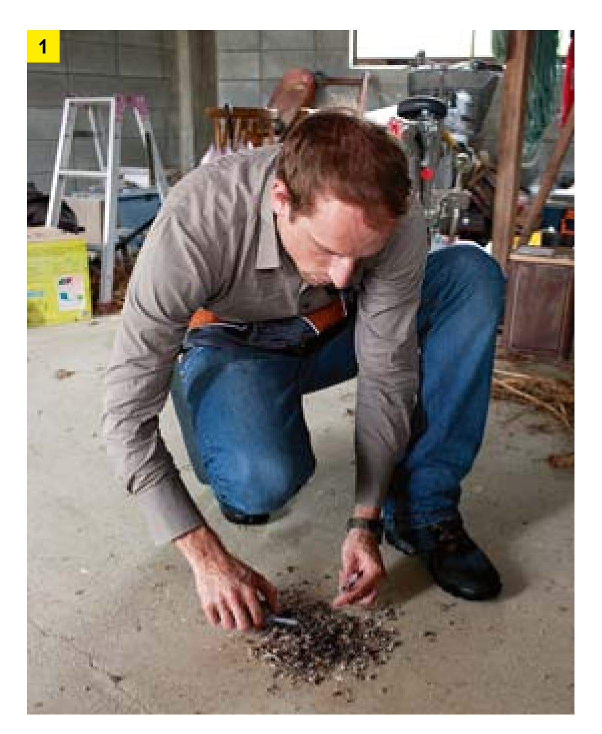
para la descontaminación. Se han fijado el límite de 1 mSv al año como objetivo a largo plazo, al tiempo que han comenzado a animar a algunos de los 83.000 evacuados a regresar a aquellos lugares donde la dosis anual no supere los 20 mSv, equivalente al límite fijado para el personal de las centrales nucleares. Hace poco, el partido dirigente en Japón emitió un informe en el que reconocía que muchas zonas contaminadas no serían habitables hasta, por lo menos, dentro de una generación.

Ese vaivén de criterios revela la brecha que separa el conocimiento sobre los efectos de la radiación a dosis bajas y las políticas públicas destinadas a fijar —entre otros aspectos— los protocolos de descontaminación nuclear. Aunque los especialistas no han determinado ninguna dosis «segura», los administradores japoneses necesitan una cifra para diseñar las políticas de limpieza y reasentamiento, por lo que dependen de organismos asesores, como la Comisión Internacional de Protección Radiológica, y de estudios incompletos, como el LSS.

«No hay más remedio que fijar límites arbitrarios», aclara David Brenner, director del Centro de Investigación Radiológica de la Universidad de Columbia. «Son arbitrarios porque desconocemos los riesgos. Y más arbitrarios aún porque probablemente no se trata una cuestión de sí o no, ni de seguro frente a arriesgado.» Las investigaciones de Brenner apuntan a una mayor incidencia de cáncer con dosis de tan solo 5 mSv al año. Por debajo de ese límite no existen pruebas sólidas a favor o en contra de un riesgo para la salud humana, si bien Mousseau y Møller han observado efectos negativos en poblaciones animales y vegetales. De los residentes de Fukushima expuestos a la radiación en los cuatro meses posteriores al desastre, el 97 por ciento recibió dosis inferiores a 5 mSv. «Al trabajar con dosis tan pequeñas, deberíamos conocer bien los mecanismos subyacentes. Y sabemos bastante poco sobre ellos», confiesa Brenner.

En un barrio residencial de las afueras de Namie, Bonisoli Alquati vio un nido de golondrinas en un angosto callejón entre dos casas. Era el primero habitado que veía tras una larga jornada vagando por los barrios desiertos de Futaba y Namie, donde contabilizó docenas de nidos abandonados. Era crucial contarlos antes de que la lluvia borrara sus rastros, ya que así podrían calcular el tamaño de la población de golondrinas antes del accidente. Pero Mousseau también necesitaba aves vivas para su trabajo de laboratorio. El nido del callejón contenía tres huevos hueros y tres polluelos, los primeros que hallaron en la zona. «Se trata de un nido importante», señaló Mousseau. Una voz grabada emitida por la megafonía pública resonaba sobre las colinas brumosas y los arrozales en barbecho: la zona quedaría clausurada en una hora.

Bonisoli Alquati se acomodó en el asiento delantero del coche. Sacó un polluelo de un envase de plástico y lo sometió a varias mediciones. Sopló sobre el plumón del ala para dejar al descubierto un poco de piel, que pinchó con una aguja. Con la sangre que manaba llenó un tubo capilar y vertió otra gota sobre un portaobjetos. Después, tomó la cría con una bolsa de tela y la introdujo en el «horno», una pila de ladrillos de plomo sujetos con cinta de embalar. El conjunto formaba una cámara protectora que permitió a Mousseau medir la carga radiactiva del animal sin interferencias de la radiación ambiental.

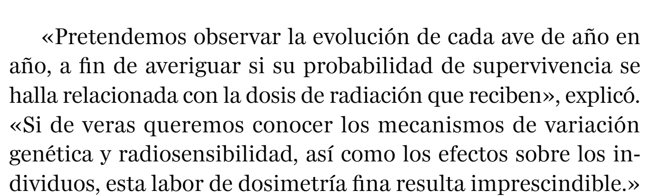






EL BIÓLOGO ANDREA BONISOLI ALQUATI rasca heces de golondrina secas en un garaje cercano a Futaba (*1*) y extrae sangre a una golondrina para buscar indicios de daños genéticos y estrés oxidativo (*2*). Timothy A. Mousseau sostiene una golondrina capturada en Okuma (*3*); al lado, libera un ejemplar en Futaba (*4*).





«Pretendemos observar la evolución de cada ave de año en año, a fin de averiguar si su probabilidad de supervivencia se halla relacionada con la dosis de radiación que reciben», explicó. «Si de veras queremos conocer los mecanismos de variación genética y radiosensibilidad, así como los efectos sobre los individuos, esta labor de dosimetría fina resulta imprescindible.»

Los niveles de radiación en el lugar eran demasiado altos para realizar mediciones precisas, por lo que Mousseau movió el vehículo calle abajo y reajustó el espectrómetro gamma. Unos minutos después, el dispositivo mostró una señal inequívoca de contaminación por cesio 137, el radioisótopo más abundante en Fukushima. El polluelo, quizá de una semana de vida, era radiactivo.

La policía retenía cada día el vehículo de Mousseau para examinar los permisos. Lo único que podía entender del tenso diálogo era *tsubame*, «golondrina común» en japonés. Su mención solía provocar una sonrisa perpleja en los interlocutores. En Japón, las golondrinas se consideran aves de buen augurio, por lo que numerosas personas instalan pequeñas plataformas de madera en el tejado de sus casas para atraer a las aves. En la zona restringida, las plataformas estaban tan vacías como las viviendas.

Para disponer de un grupo de control, Mousseau y Bonisoli Alquati trabajaban todos los días hasta bien entrada la noche capturando golondrinas en las zonas limpias ubicadas al norte de Fukushima. «Limpio» es un término relativo. La radiación de fondo en Minamisoma, evacuada durante el desastre, aún duplica la tasa normal. Pese a ello, después de todo un día en la zona restringida, los pulcros vecindarios de Minamisoma, idénticos a los de Namie, Futaba y Okuma, parecían un universo paralelo. Llamaba la atención hallar nidos de golondrina rebosantes de polluelos rollizos y piones. Curiosos, los vecinos salían a menudo a mirar cómo Mousseau y Bonisoli Alquati atrapaban las aves. Siempre les ofrecían té y pastas y, en tono amable, preguntaban por la radiación.

«El año pasado, una de las cosas más sorprendentes de ir de casa en casa era que la gente nos preguntaba: "¿Es seguro o no? ¿Podemos vivir aquí?"», recordaba Bonisoli Alquati. «Pero eso deben decirlo los políticos. Yo me limitaba a explicarles que estábamos allí por los pájaros.»

El último día en Japón, en una callejuela de Kashima, Mousseau descubrió un nido habitado en el porche de una casa abandonada. Un vecino le dio permiso para capturar las aves. Miembro de una asociación ecologista local, el hombre no ocultó su alegría al ver que alguien investigaba la contaminación radiactiva, ya que el Gobierno no lo hacía. «Siempre con secretos, este Gobierno», dijo quejándose de la lluvia radiactiva vertida al río. Nos explicó que las carpas koi de sus aguas registraban 240.000 becquerelios de cesio por kilogramo (un becquerelio corresponde a una desintegración radiactiva por segundo), por lo que ya nadie las come. Por suerte, ya que en Japón el límite para el consumo se sitúa en 100 becquerelios por kilogramo.

Otros vecinos preguntaron a Mousseau si podía sondear la calle con su dosímetro. El investigador accedió y garabateó algunas cifras —todas ellas muy por encima de los niveles normales— en un pedazo de papel que el hombre de la asociación ecologista aceptó con una solemne reverencia.

Mientras plegábamos las redes para marcharnos, apareció una anciana con un puñado de mandarinas. Entendí que me decía algo así como «seguro para comer». «Lo siento, no puedo ayudarle», respondí. La mujer volvió a ofrecérmelas, con lo que me di cuenta de que no se trataba de una pregunta: me garantizaba que el obsequio no estaba contaminado. «Seguras», dijo con una sonrisa. «De Nagasaki.»

El cuarenta por ciento de nosotros será diagnosticado algún día con una u otra forma de cáncer. Si en el ruido de esta sombría estadística se esconde alguna señal de tumores causados por la radiación de baja intensidad, es demasiado tenue para que los epidemiólogos puedan detectarla. Según Brenner, las grandes preguntas al respecto habrán de ser respondidas por quienes estudian los daños cromosómicos provocados por la radiación, la expresión génica inducida por la radiactividad o la inestabilidad genómica. Ese es el camino que Mousseau y Møller han comenzado a recorrer con sus estudios sobre la golondrina común.

«Por desgracia, un tumor no nos dice si ha sido provocado por la radiación o por otra causa», señala Mousseau. El investigador explica que, si dispusiese de los fondos necesarios, secuenciaría el ADN de cada una de las golondrinas a las que ha fijado un dosímetro termoluminiscente. Al cruzar los resultados con la dosis estimada recibida por cada animal, tal vez fuese posible identificar biomarcadores genéticos de enfermedades producidas por la radiación.

Mousseau viajó por decimosegunda vez a Fukushima el pasado mes de noviembre, 18 meses después de nuestro viaje juntos. Él y Møller han publicado varios artículos en los que demuestran que las poblaciones de aves de la zona están experimentando un pronunciado declive. Mousseau asegura que el último censo, aparecido hace poco en el *Journal of Ornithology*, ofrece pruebas «impactantes» de una mengua continuada, sin indicio alguno de un efecto umbral. Por algún motivo, la radiación de Fukushima parece estar acabando con los pájaros dos veces más rápido que en Chernóbil. «Tal vez las poblaciones autóctonas de Fukushima carezcan de resistencia o sean mucho más sensibles a la radiación», especula Mousseau. «O quizá las de Chernóbil hayan desarrollado cierto grado de resistencia, o las más sensibles hayan desaparecido en el curso de los últimos 26 años. No lo sabemos, pero esperamos averiguarlo.»

Tal vez la respuesta se esconda en la sangre de las golondrinas que Mousseau y Bonisoli Alquati atraparon durante el viaje. Los análisis preliminares no han arrojado indicios de un incremento sustancial de daños genéticos, pero aún es demasiado pronto para extraer conclusiones definitivas. Para ello, Mousseau necesitará muchas más muestras de golondrinas procedentes de las zonas más contaminadas, donde las poblaciones se están desplomando.

A pesar de que los primeros hallazgos de Mousseau y Møller aportan indicios convincentes de que el ecosistema de Fukushima ha sufrido daños, el informe publicado en 2014 por el Comité Científico de la ONU sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR) repite la valoración de Chernóbil. Insiste en que los efectos sobre la biota no humana de las zonas más contaminadas son «inciertos» y que, en las regiones menos afectadas, resultan «insignificantes».

«Estamos haciendo ciencia básica, no toxicología. Pero el UNSCEAR no se ha tomado la molestia de preguntarnos por nuestro trabajo ni de buscar a alguien que lo interprete», asegura Mousseau. «Ellos establecen las normas de protección para la salud humana, pero están ignorando un gran volumen de información potencialmente relevante.»

El investigador resalta la importancia de los datos que están pasando por alto: «En mis años de experiencia en Chernóbil y ahora en Fukushima, hemos hallado indicios de un aumento en las tasas de mutación de casi todas las especies y redes ecológicas que hemos analizado. Toda la información está ahí, esperando a ser estudiada, descrita y publicada».

Aunque Baker no tiene planes para investigar en Fukushima, hace poco secuenció el ADN de un género de topillos de Chernóbil distinto del de sus primeros estudios. Los datos parecen avalar las conclusiones de Mousseau y Otaki sobre la existencia de un vínculo entre tasas de mutación elevadas y la exposición a la radiación. Quedan aún por averiguar las consecuencias de una exposición multigeneracional, si ello merma o no la aptitud biológica o la capacidad reproductiva de los animales, y si causa defectos congénitos o cáncer en las generaciones futuras. «Hemos de seguir investigando los genomas, ya que la verdadera historia se encuentra escrita en ellos», concluye Baker.

PARA SABER MÁS

Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience. Informe del grupo de expertos ambientales del Fórum de Chernóbil. Organismo Internacional de la Energía Atómica, 2006.

Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Consejo Nacional de Investigación de EE.UU. National Academies Press, 2006.

Chernobyl: Consequences of the catastrophe for people and the environment. Alexey V. Yablokov et al. en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1181, diciembre de 2009.

UNSCEAR 2013 Report, vol. 1: Sources, effects and risks of ionizing radiation. Organización de las Naciones Unidas, abril de 2014.

Chronic exposure to low-dose radiation at Chernobyl favours adaptation to oxidative stress in birds. Ismael Galván et al. en *Functional Ecology*, vol. 28, n.º 6, págs. 1387-1403, diciembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Chernóbil, diez años después. Yuri M. Shcherbak en *IyC*, junio de 1996.

Radiaciones ionizantes. Guillem Cortés Rossell en *IyC*, mayo de 2011.

ASTROFÍSICA

El enigma de los púlsares ausentes

El agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea debería estar rodeado por cientos de púlsares. ¿Por qué no se observan?

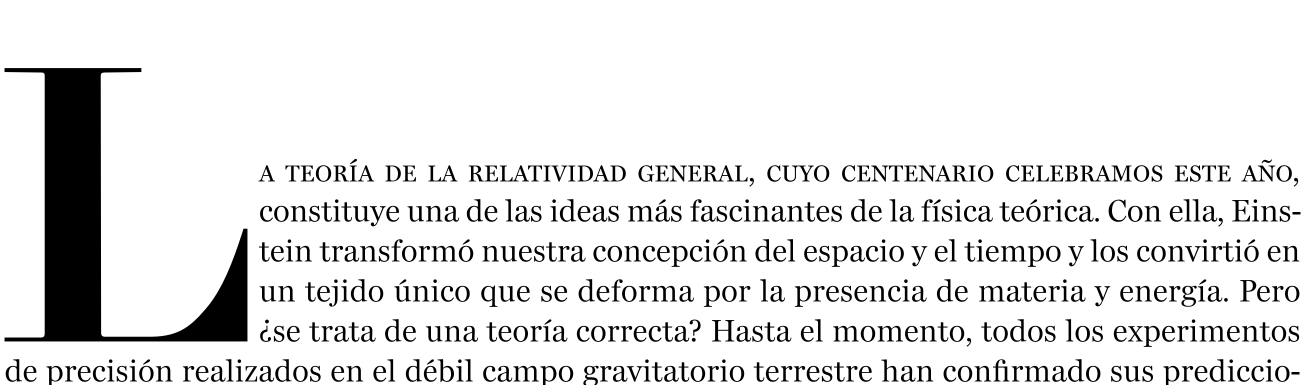
Heino Falcke y Michael Kramer

EL CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA constituye un lugar idóneo para poner a prueba la teoría de la relatividad general. A la derecha de esta imagen, en colores falsos, puede verse el centro de la galaxia, situado en la región más brillante. La emisión en rayos X se muestra en azul; la infrarroja, en tonos rojizos y amarillentos.



Heino Falcke es experto en radioastronomía. Enseña e investiga en la Universidad Radboud de Nimega, en los Países Bajos.

Michael Kramer es director del Instituto Max Planck de Radioastronomía de Bonn y profesor de astrofísica de las universidades de Bonn y Manchester.



LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL, CUYO CENTENARIO CELEBRAMOS ESTE AÑO, constituye una de las ideas más fascinantes de la física teórica. Con ella, Einstein transformó nuestra concepción del espacio y el tiempo y los convirtió en un tejido único que se deforma por la presencia de materia y energía. Pero ¿se trata de una teoría correcta? Hasta el momento, todos los experimentos de precisión realizados en el débil campo gravitatorio terrestre han confirmado sus predicciones. Sin embargo, la pregunta de si la relatividad general sigue siendo válida en condiciones extremas continúa abierta.

Lo ideal sería ponerla a prueba en el intenso campo gravitatorio de un agujero negro, donde el espaciotiempo se curva hasta tal punto que, en el horizonte de sucesos, el tiempo parece detenerse. No obstante, para ello necesitaríamos también un buen reloj. Por fortuna, existe una clase de astros que pueden emplearse como cronómetros naturales y cuya precisión no tiene nada que envidiar a la de un reloj atómico: los púlsares.

Estos objetos se forman cuando una estrella muy masiva estalla en forma de supernova. Cuando eso sucede, queda un remanente muy compacto, en el que una masa de en torno a 1,4 veces la del Sol acaba comprimida en una esfera de apenas 20 o 30 kilómetros de diámetro. En el caso de un púlsar, el resultado es una estrella de neutrones que gira sobre sí misma con un período de entre segundos y milisegundos, posee un campo magnético de entre 10^4 y 10^{10} teslas, y emite ondas de radio a lo largo de dos estrechos conos. La dirección de propagación de la radiación rota junto con la estrella, por lo que desde la Tierra se observan pulsos de radiación muy regulares. Podemos compararlo con la luz de un faro, la cual nos llega en forma de destellos espaciados entre sí por intervalos de tiempo constantes.

Los púlsares rotan de un modo tan uniforme que, en algunos casos, su período puede determinarse con una precisión de attosegundos; es decir, de una trillonésima de segundo (10^{-18} segundos). Las variaciones en el período de uno de estos objetos indican que este se mueve en un campo gravitatorio variable, lo que da lugar a una situación idónea para poner a prueba la teoría de la relatividad.

Por esa razón, los sistemas en los que un púlsar gira alrededor de otra estrella de neutrones resultan especialmente atractivos. En los años setenta y ochenta del pasado siglo, las observaciones del célebre sistema binario de Hulse y Taylor, PSR B1913+16, permitieron la primera detección indirecta de ondas gravitacionales. No menos prominente resulta PSR J0737-3039, el único púlsar doble conocido hasta la fecha, el cual también ha ayudado a confirmar varias de las predicciones de la relatividad general.

¿Qué sería más natural que continuar tales investigaciones con un púlsar que orbitase en torno a Sagitario A*, el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea? Como ocurre con todos los agujeros negros, todo lo que sabemos sobre Sagitario A* (abreviado Sgr A*) procede de mediciones indirectas. Desde la Tierra se observa como una fuente de ondas de radio alrededor de la cual giran estrellas a gran velocidad. A partir del movimiento de estas últimas, registradas con precisión durante años en el infrarrojo cercano, puede concluirse con bastante fiabilidad que dicha fuente de radio corresponde a un objeto muy masivo y compacto.

Sgr A* se halla en el centro de la galaxia, en medio de un cúmulo estelar que contiene millones de soles. Sabemos que,

EN SÍNTESIS

Hace tiempo que los astrónomos buscan un púlsar que orbite cerca del agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea. Ello permitiría poner a prueba la teoría de la relatividad general en presencia de campos gravitatorios extremos.

Se estima que en el centro de la galaxia debería haber entre cientos y miles de tales objetos compactos. Sin embargo, hasta hace poco no se había detectado ninguno. El primero en observarse ha sido un magnetar, un tipo de púlsar exótico.

La hipótesis más aceptada plantea que los púlsares del centro galáctico se ocultarían tras una «pantalla translúcida» de gas caliente. No obstante, el magnetar descubierto recientemente no ha hecho sino ahondar el misterio.

PÁGINAS ANTERIORES: NASA/JPL/CALTECH/ESA/CXC/STSCI

en este tipo de acumulaciones, suele haber en torno a un púlsar por cada 10.000 estrellas. Por tanto, cabría esperar que en el cúmulo estelar del centro de la Vía Láctea hubiera cientos, si no miles, de púlsares. Pero, sorprendentemente, y a pesar de las numerosas exploraciones llevadas a cabo durante años, hasta hace muy poco los astrónomos no habían conseguido observar ninguno.

UN HALLAZGO INESPERADO

Para explicar el misterio de los púlsares ausentes se han formulado varias hipótesis. Una de ellas se antoja especialmente persuasiva: el centro galáctico podría hallarse envuelto por una «pantalla translúcida» de gas caliente que, con un tamaño de cientos de años luz, dispersaría las ondas de radio hasta tal punto que nos impediría apreciar pulsos individuales. Varios indicios apuntan a la existencia de una pantalla difusora semejante. De hecho, al observar Sgr A* y otras fuentes de radio presentes en el centro galáctico, estas se muestran borrosas y ampliadas, lo que corrobora tal hipótesis.

La magnitud de ese desenfoque disminuye con el cuadrado de la frecuencia de observación, un claro signo de la existencia de efectos dispersivos. Estos provocan que las ondas de radio recorran trayectorias de diferente longitud dependiendo de si llegan a la Tierra en línea recta o si dan un rodeo por el borde de la pantalla difusora. Si una pantalla semejante se encontrase en el centro de la Vía Láctea, las diferencias entre el camino recorrido por la radiación directa y la dispersada alcanzarían tal magnitud que los pulsos individuales se «ensancharían» en el tiempo hasta tornarse irreconocibles. Ello haría imposible detectar ningún púlsar.

Como consecuencia de lo anterior, las esperanzas de hallar un púlsar en el centro galáctico disminuyeron de manera considerable durante los últimos años. Algunos investigadores intentaron incrementar sus posibilidades de éxito recurriendo a observaciones en frecuencias mayores, menos propicias a experimentar los efectos de la pantalla. Pero el problema reside en que, a tales frecuencias, los púlsares radian con menor intensidad.

En 2013, sin embargo, ocurrió algo inesperado. El satélite Swift, de la NASA, estaba llevando a cabo un programa de observaciones para controlar el brillo en rayos X de Sgr A*, pues había indicios de que, en algún momento de ese año, una nube de gas interestelar se precipitaría hacia el agujero negro. Y, en efecto, el 24 de abril Swift observó un fuerte aumento en la emisión de rayos X en aquella zona. De inmediato, otros telescopios se pusieron manos a la obra para intentar entender qué ocurría. Aunque en las longitudes de onda de radio Sgr A* no mostraba nada fuera de lo normal, la duración del estallido de rayos X era mucho mayor de lo que cabía esperar.

En cuestión de días, otros dos telescopios de rayos X, Chandra y NuSTAR, también de la NASA, descubrieron que la radiación no procedía de Sgr A*, sino de una fuente pulsante situada a unos 0,4 años luz de distancia. Los telescopios llevaban años apuntado al centro de la galaxia, pero nunca se había observado un estallido de rayos X de tales características en las inmediaciones de Sgr A*.

A partir de las fluctuaciones periódicas de la intensidad de la radiación, los astrónomos determinaron que debía tratarse de un magnetar, un tipo muy especial y poco frecuente de púlsar caracterizado por un campo magnético extremo. Aunque estos objetos no suelen emitir ondas de radio (hasta entonces solo se habían detectado tres astros de tales características en la Vía Láctea), varios radiotelescopios emprendieron una carrera para intentar confirmar el hallazgo también en radiofrecuencias.



LABORATORIO ESTELAR: Un test ideal para comprobar si la teoría de la relatividad general sigue siendo válida en condiciones de gravedad extrema consistiría en estudiar el comportamiento de un púlsar (*izquierda*) que orbite alrededor de un agujero negro (*derecha*). Hasta el momento, los investigadores no han conseguido localizar un sistema semejante.

INSTITUTO MAX PLANCK DE RADIOASTRONOMÍA DE BONN

LOCALIZACIÓN INCIERTA

Los científicos del Observatorio Parkes, en Australia, fueron los primeros en anunciar la detección de ondas de radio por parte del magnetar. Sin embargo, concluyeron que este no se encontraba en el centro de la galaxia, sino mucho más cerca de la Tierra. Su razonamiento se basaba en que, cuando las ondas de radio atraviesan plasma a altas temperaturas, se retrasan debido a los electrones libres presentes en dicho medio. Ese retraso resulta mayor cuanto menor es la frecuencia de la onda. La medida de esta dispersión de frecuencias permite estimar la densidad media de electrones libres entre el púlsar y la Tierra. Y, dado que la distribución de gas en la Vía Láctea se conoce con una precisión razonable, a partir de ella puede calcularse la distancia al púlsar.

Con todo, persistían algunas dudas. Aunque ese método se considera lo suficientemente fiable para distinguir un objeto cercano de otro situado en el centro de la galaxia, parecía muy poco probable que una fuente de radiación tan poco común se hallase justo en la línea de visión del centro galáctico. De hecho, pronto se demostró que la conclusión de los investigadores de Parkes era errónea: un fallo en el sistema de seguimiento del telescopio (el mecanismo que lo orienta hacia el objeto observado), intrascendente en condiciones normales y que había pasado inadvertido durante más de 40 años, había interferido de manera inesperada en las mediciones.

De manera simultánea a nuestros colegas australianos, los autores de este artículo habíamos comenzado a investigar la misteriosa fuente. Junto con un equipo de astrónomos jóvenes, procedentes en su mayoría del Instituto Max Planck de Radioastronomía de Bonn, y bajo la dirección de Ralph Eatough, apuntamos el radiotelescopio de 100 metros de Effelsberg hacia

el centro galáctico. En cuanto este volvió a elevarse sobre el horizonte, pudimos comprobar que habíamos tenido suerte: el magnetar apareció en los datos, al principio muy débil y luego cada vez con mayor claridad. Tras emitir durante varios días intensos rayos X, resultaba evidente que había comenzado a brillar también en ondas de radio. Además, la dispersión de frecuencias era exactamente la que cabía esperar de un objeto situado en el centro de la Vía Láctea. No en vano, era la mayor que nunca se había medido en un púlsar.

Nos llamó especialmente la atención que la emisión en ondas de radio estuviese polarizada casi al 100 por cien y que presentase una medida de rotación muy elevada. Esta magnitud, que cuantifica la rotación del plano de polarización para cada frecuencia, depende de la intensidad del campo magnético en el gas que rodea al objeto y —al igual que la dispersión de frecuencias— del número de electrones a lo largo de la línea de visión. El magnetar volvió a romper todos los récords. Nunca se había registrado una medida de rotación tan alta para ninguna otra fuente de la galaxia... con una sola excepción: Sgr A*. Así pues, parecía que el magnetar y el agujero negro eran vecinos y que ambos se hallaban envueltos por un gas fuertemente magnetizado.



RAYOS X Y ONDAS DE RADIO: Después de que los satélites de rayos X NuSTAR y Chandra, de la NASA, descubrieran un magnetar en el centro de la Vía Láctea, los autores de este artículo y sus equipos de investigación apuntaron el radiotelescopio de Effelsberg (*fotografía*) hacia esa zona del cielo. Gracias a ello, lograron detectar las emisiones en ondas de radio del objeto.

THINKSTOCK/STATU-NASCENDI

EL MISTERIO DEL CENTRO GALÁCTICO

Las mediciones previas en rayos X ya habían revelado la existencia de gas ionizado en torno a Sgr A* a una temperatura de 20 millones de grados. En tales condiciones, los electrones son arrancados de los átomos y emiten rayos X cuando chocan de manera aleatoria con los núcleos atómicos. Al analizar la intensidad y el espectro de dicha radiación, pueden determinarse la temperatura y la densidad del gas.

Por otro lado, a partir de observaciones en ondas de radio y en rayos X, resulta posible deducir la intensidad del campo magnético en el entorno del agujero negro. Esta asciende a 0,8 millonésimas de Tesla, una cuadragésima parte del campo magnético terrestre, ya de por sí muy débil. Pero, a diferencia del campo de nuestro planeta, el de Sgr A* se extiende a lo largo de un volumen enorme. De hecho, la energía magnética almacenada en un radio de 0,4 años luz alrededor del agujero negro equivale a la producción anual de cuatro millones de soles.

Sin embargo, los modelos de emisión en ondas de radio de Sgr A* indican que, en las inmediaciones del horizonte de sucesos, existen campos magnéticos hasta cien veces más intensos que el terrestre. Al respecto, es posible que los campos existentes aumenten su intensidad a medida que el gas se comprime en su caída hacia el objeto. Ello también aclararía por qué Sgr A* aparenta ser un agujero negro «a dieta», que apenas acreta materia: si un fuerte campo magnético retiene parte del gas, la cantidad de este que se precipita hacia el astro se mantendría relativamente baja.

Poco después, otros telescopios confirmaron nuestras observaciones. Pero nos aguardaban más sorpresas. En contra de todas las expectativas, los pulsos de radio del magnetar no solo podían detectarse a frecuencias bajas, sino que su ensanchamiento era mucho menor de lo previsto. ¿Tal vez el púlsar no se encontraba detrás de la pantalla difusora, sino delante de ella? Ello explicaría por qué podíamos detectar los pulsos. Más tarde, las mediciones realizadas con la red de radiotelescopios VLBA, un conjunto de diez antenas situadas a lo largo de EE.UU., zanjaron la cuestión. El púlsar se mostraba tan borroso como Sgr A*, por lo que las ondas tenían que haber atravesado la misma pantalla difusora.

A pesar de todo, que una serie de pulsos de frecuencias bajas presentasen un ensanchamiento tan corto significaba que la pantalla difusora debía estar en algún lugar a medio camino entre la Tierra y el centro galáctico. Pero, de ser el caso, si hubiese otros púlsares en el centro de la Vía Láctea, estos también tendrían que poder verse. Se estima que por cada magnetar existen unos 500 púlsares normales. ¿Dónde estaban?

Parece poco probable que el denso gas de la región central solo deje pasar algunas emisiones de radio, ya que el magnetar podía observarse sin problemas desde allí. Tal vez en el centro de la galaxia el proceso de gestación estelar ocurra de manera diferente a la habitual y obstaculice la formación de púlsares ordinarios. Pero las observaciones en el infrarrojo revelan que, en los últimos millones de años, han nacido allí numerosas estrellas que deberían acabar sus vidas convertidas en estrellas de neutrones.

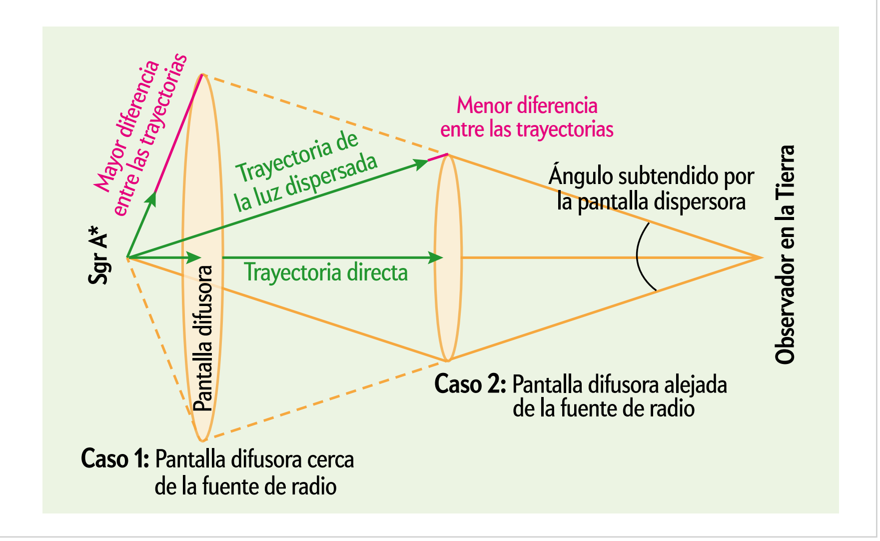
De las cerca de dos docenas de magnetares que se conocen, muchos corresponden a objetos jóvenes, originados a partir de la explosión de sus estrellas progenitoras hace apenas unas decenas de miles de años. Los púlsares también parecen seguir formándose hoy en día. ¿Quizá la pantalla difusora se encuentre llena de agujeros, como un queso de gruyer? Pero entonces deberíamos explicar por qué la radiación electromagnética de

¿Una pantalla difusora en el centro de la galaxia?

En el centro de la galaxia se encuentra Sgr A*, una fuente compacta de ondas de radio que los investigadores identifican desde hace tiempo con un agujero negro supermasivo. En su camino hacia la Tierra, las ondas de radio procedentes de dicha zona pueden viajar en línea recta o ser dispersadas y tomar caminos indirectos (*líneas verdes*). Los astrónomos creen que entre Sgr A* y nuestro planeta existe un «pantalla difusora» de gas caliente, la cual desviaría la radiación electromagnética. Ello explicaría por qué no se observan púlsares en el centro galáctico.

Sin embargo, la posición y dimensiones de dicha pantalla no están claras. Si esta se encuentra muy cerca de la fuente (*caso 1*), la diferencia (*rojo*) entre la trayectoria recorrida por la radiación dispersada y la que llega en línea recta será mayor que si la pantalla se halla más próxima a la Tierra (*caso 2*). En el primer caso, los pulsos de radiación emitidos por un púlsar que se sitúe tras el difusor aparecerían muy ensanchados y desdibujados. Dado que esto no se observa, los investigadores creen que la pantalla se encuentra alejada del centro galáctico.

En este gráfico simplificado, la imagen de Sgr A* aparece en ambos casos bajo el mismo ángulo desde la perspectiva de un observador terrestre. Ello implica que las dimensiones de la pantalla difusora dependen de cuán lejos se encuentre esta de nuestro planeta.



Sgr A*, el magnetar y otras fuentes situadas en la misma zona se dispersa exactamente de la misma manera. Es posible que aún no entendamos el proceso de dispersión adecuadamente.

A LA ESPERA DEL «PÚLSAR DE ORO»

Hoy por hoy carecemos de una solución sencilla para el problema de los púlsares en el centro galáctico. Simplemente, las piezas del rompecabezas no encajan. Por desgracia, los magnetares como el descubierto no pueden emplearse como relojes de precisión. Ello se debe a que, probablemente, el intenso campo magnético deforma la superficie del objeto y altera su rotación o el punto en que se origina la emisión de radio. Con todo, donde hemos hallado un objeto tan joven y poco común deberíamos ser capaces de detectar otros. Con suerte, antes o después hallaremos un «púlsar de oro» que nos permita poner a prueba las predicciones de la relatividad general en condiciones extremas.

A tal fin ya hay nuevos proyectos en marcha. A finales de 2013, el Consejo Europeo de Investigación concedió a nuestro equipo y al de Luciano Rezzolla, de la Universidad Goethe de Fráncfort, 14 millones de euros para «fotografiar» por primera vez el horizonte de sucesos de Sgr A*. Dicha fotografía, tomada con una red de radiotelescopios, consistirá en una silueta contra el fondo de ondas de radio emitidas por el gas justo antes de ser devorado por el agujero negro [*véase* «Retrato de un agujero negro», por Avery E. Broderick y Abraham Loeb; Investigación y Ciencia, febrero de 2010]. La búsqueda de púlsares, que resultará considerablemente más sencilla en el futuro, también forma parte de este proyecto.

Por otro lado, hace poco entró en funcionamiento la red de radiotelescopios ALMA, en el desierto chileno de Atacama. Este observatorio podrá medir frecuencias más altas, inmunes al efecto de la dispersión. De modo que, si el centro galáctico alberga más púlsares, antes o después deberíamos poder detectarlos.

Por último, la batería de radiotelescopios SKA, cuya construcción se prevé que comience dentro de poco en Sudáfrica y Australia, también ofrecerá nuevas oportunidades. Un consorcio holandés en el que participa la Universidad Radboud de Nimega, donde investiga uno de nosotros (Falcke), llevará a cabo una parte de las tareas de diseño. Muy a nuestro pesar, el Gobierno alemán anunció hace poco la retirada de Alemania del proyecto. Una gran decepción para los radioastrónomos que investigamos en el país, a quienes solo nos queda esperar que la opción de reincorporarse no esté completamente cerrada.

PARA SABER MÁS

A strong magnetic field around the super-massive black hole at the centre of the galaxy. R. Eatough et al. en *Nature*, vol. 501, págs. 391-394, 14 de agosto de 2013.

Swift discovery of a new soft gamma repeater, SGR J1745-29, near Sagittarius A*. J. A. Kennea et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 770, pág. L24, 2013.

NuSTAR discovery of a 3.76-second transient magnetar near Sagittarius A*. K. Mori et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 770, pág. L23, 2013.

Direct formation of millisecond pulsars from rotationally delayed accretion-induced collapse of massive white dwarfs. P. Freire y T. Tauris en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 438, págs. L86-L90, 11 de febrero de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Púlsares y ondas gravitacionales. Michael Kramer y Norbert Wex en *IyC*, abril de 2013.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Limpieza electromagnética del espacio

¿Cómo eliminar la chatarra espacial del entorno terrestre?

Hace años que las inmediaciones de nuestro planeta se encuentran cada vez más llenas de todo tipo de chatarra, desde piezas desprendidas en colisiones de satélites hasta instrumentos enteros que han perdido el control o cuya vida útil ha terminado. Algunas órbitas ya comienzan a estar tan atiborradas que, antes o después, el riesgo de choque acabará siendo inaceptable [*véase* «El vertedero de la era espacial», por John Matson; Investigación y Ciencia, noviembre de 2012].

Ante tal perspectiva, hace tiempo que los expertos estudian posibles técnicas de limpieza. Aparte de métodos similares a los empleados en tierra firme, como la recogida de restos mediante brazos robóticos, los científicos intentan sacar partido de una particularidad del entorno espacial: debido a la práctica ausencia de rozamiento, una pequeña fuerza aplicada durante largo tiempo puede llegar a producir efectos notables.

En las zonas en que la atmósfera es lo bastante densa, el rozamiento con el aire puede frenar los objetos en órbita, hacerlos regresar a la superficie e incluso desintegrar los de menor tamaño. A 200 kilómetros de altitud, la vida útil de un satélite apenas llega a 60 días. Sin embargo, a medida que nos elevamos, la densidad del aire y el rozamiento disminuyen. A 250 kilómetros, la vida de un objeto asciende a 220 días; a partir de los 500 kilómetros, a varios años, y a 1000 kilómetros se mide ya en siglos.

Para las órbitas bajas comprendidas entre 500 y 2000 kilómetros de altitud, el mejor procedimiento para desembarazarse de un satélite consiste en hacerlo descender hasta los 200 kilómetros y, después, dejar que la atmósfera haga el resto del trabajo. Para ello, sin embargo, el objeto debe frenarse en unos 400 metros por segundo. ¿Cómo lograrlo?

Frenar la chatarra en órbita

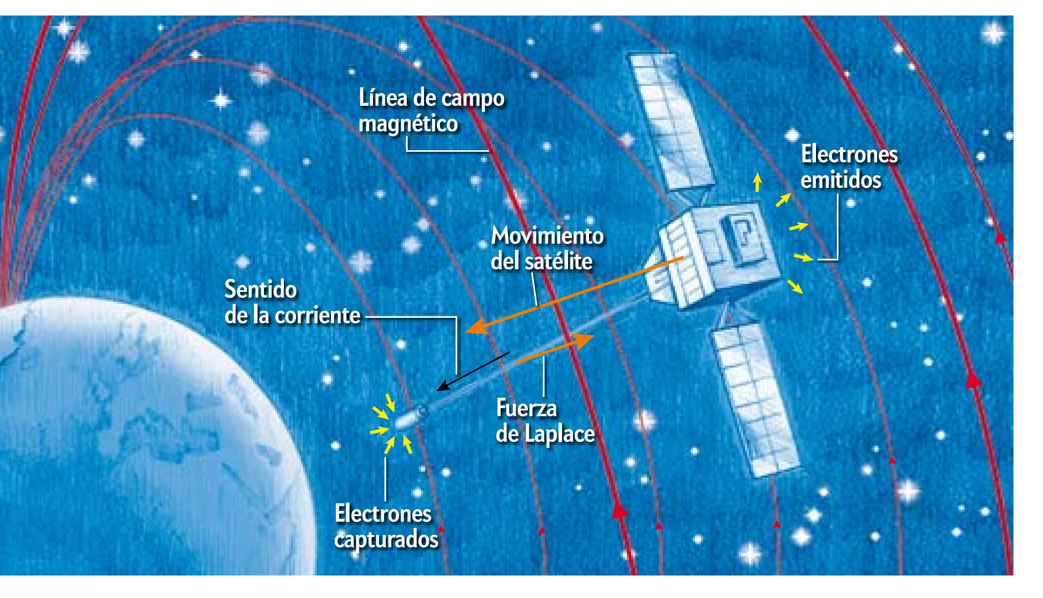
La solución empleada en la actualidad consiste en usar motores a reacción que eyecten masa en la dirección del movimiento. Pero, por desgracia, la cantidad de materia necesaria para frenar un satélite se sitúa en torno a un quinto de su masa. Ello implica poner en órbita cerca de un 20 por ciento de masa suplementaria, con el consiguiente sacrificio de carga útil. ¿Hay alternativas?

Alcanzar una velocidad de 400 metros por segundo puede parecer un objetivo considerable. Sin embargo, si disponemos del tiempo suficiente, la fuerza necesaria no resultará tan elevada. Para una operación de cuatro meses; es decir, de unos 10 millones de segundos, se requiere una aceleración del orden de $4 \cdot 10^{-5}$ metros por segundo al cuadrado, equivalente a unas cuatro millonésimas de la aceleración de la gravedad. En el caso de un satélite de una tonelada, eso correspondería a una fuerza de 40 milinewtons. ¡El peso de una masa de 4 gramos!

Pero ¿cómo generar una fuerza que, por débil que sea, debe ejercerse durante un período de tiempo tan largo? Una primera idea consiste en recurrir al mismo mecanismo usado en los motores eléctricos: la fuerza de Laplace que ejerce un campo magnético sobre un hilo conductor por el que circula una corriente eléctrica.

Cables conductores en el espacio

Ya disponemos de un campo magnético natural: el terrestre. Nos faltan el cable conductor y la corriente. Dado lo exiguo del campo magnético de nuestro planeta (unas



EN UN CABLE CONDUCTOR de gran longitud suspendido de un satélite que se mueva en el campo magnético terrestre se inducirá una corriente eléctrica. El circuito se cierra gracias al plasma ambiente. La fuerza de Laplace que el campo ejerce sobre dicha corriente permite modificar la trayectoria del satélite.

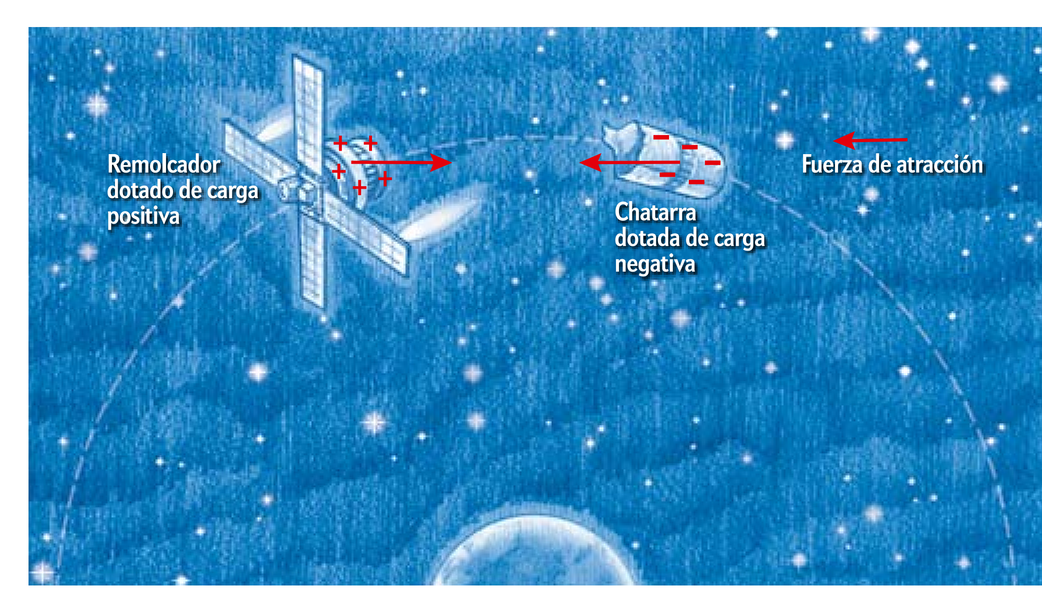
BRUNO VACARO/*POUR LA SCIENCE*

20 microteslas en las altitudes consideradas), para obtener una fuerza de 40 milinewtons con una corriente moderada, del orden de una fracción de amperio, necesitaremos un cable conductor de varios kilómetros de largo. Se trata de una longitud perfectamente viable en el espacio: la masa de un cable de aluminio de 5 kilómetros de largo y un milímetro de diámetro apenas ascendería a 7 kilogramos.

¿Cómo alimentar el cable? Dado que se trata de un conductor que se mueve en un campo magnético, entre sus extremos se inducirá una tensión. Con una velocidad de 7,2 kilómetros por segundo y a una altitud de 1300 kilómetros, se consiguen tensiones del orden del kilovoltio si el cable pende verticalmente bajo el satélite. Este último corresponderá al polo positivo del sistema si gira en torno a la Tierra de este a oeste.

Una vez sometido a esa tensión, por el cable espacial comenzará a circular una corriente. Pero ¿cómo cerrar el circuito? Hemos de recordar que, a esas altitudes, el satélite se halla inmerso en un plasma (gas ionizado) levemente conductor. Así pues, el cable mismo —como ocurre en el prototipo Terminator Tether, desarrollado por una compañía estadounidense— o un globo conductor puede capturar cargas del plasma, las cuales circularán por el cable. Para evitar que se acumulen en los extremos, lo que interrumpiría la corriente, el polo positivo del cable puede equiparse con un cañón de electrones que reinyecte en el plasma los electrones sobrantes. En total, nuestro circuito eléctrico requerirá una carga adicional de unos 30 kilogramos, del orden del diez por ciento de la masa de un satélite ordinario.

Por desgracia, el procedimiento que acabamos de describir no puede emplearse en los satélites geoestacionarios, los cuales orbitan a unos 36.000 kilómetros de la superficie terrestre. A tales altitudes, el campo magnético es mucho más débil (0,1 microteslas), el plasma se torna menos conductor y la velocidad del satélite resulta considerablemente menor (3 kilómetros por segundo), factores que no pueden compensarse con ningún alargamiento razonable del cable.



BRUNO VACARO/*POUR LA SCIENCE*

PARA EXPULSAR LA CHATARRA ESPACIAL de una órbita geoestacionaria puede emplearse un satélite remolcador que, valiéndose de un cañón de electrones, inyecte carga negativa en el objeto que debe retirarse. En el proceso, el remolcador adquiere carga negativa, lo que crea una fuerza atractiva entre ambos objetos.

Remolque a distancia

La órbita geoestacionaria se encuentra muy transitada, ya que en ella se sitúan, entre otros, los satélites de telecomunicaciones y los de observación. Pero, al contrario de lo que ocurre en las órbitas bajas, la altitud del satélite no puede modificarse siquiera ligeramente, ya que en tal caso su movimiento dejaría de ser geoestacionario. Las plazas en dicha órbita son por ello limitadas y caras. Y aunque en la actualidad hay catalogados a esa altitud unos 1200 objetos, tan solo 400 de ellos corresponden a satélites en servicio.

La idea más prometedora para limpiar esa órbita no pasa por hacer caer los instrumentos a la Tierra, sino por recolocarlos en una de las órbitas-cementerio situadas a entre 200 y 300 kilómetros por debajo de la altitud geoestacionaria. A tal fin deberíamos emplear un satélite remolcador. Pero ¿cómo enlazarlo con la chatarra? Una de las ideas propuestas resulta tan simple como atractiva: cargar eléctricamente a distancia —y, por tanto, sin riesgo de choque— tanto el remolcador como el satélite, a fin de que se atraigan. Con una diferencia de potencial de unas decenas de kilovoltios y una separación de entre 15 y 25 metros, la fuerza correspondiente ascendería a varios milinewtons, lo suficiente para cambiar de órbita en unas decenas de días (a razón de algunos kilómetros por revolución). Como contrapartida, el remolcador ha de contar con sus propios motores.

La ejecución de una operación semejante seguiría necesitando un cañón de electrones. Para una maniobra de aproximación, el remolcador se situaría en la misma órbita que la chatarra, a una veintena de metros de ella y accionaría el cañón de electrones apuntando al satélite. Este último ganaría carga negativa, al tiempo que el remolcador, al expulsar electrones, quedaría dotado de carga positiva.

Dado que a esa altitud el plasma ambiente es poco conductor, los satélites no se descargarían con demasiada rapidez. Y, al ser portadores de cargas opuestas, ambos objetos se atraerían uno a otro. A continuación, se ajustarían la fuerza de atracción del remolque y el chorro del cañón de electrones para que el remolcador y la chatarra mantuvieran su separación mutua y experimentaran la misma aceleración, con lo que se alejarían a la par de la órbita geoestacionaria.

PARA SABER MÁS

The Terminator Tether™: Autonomous deorbit of LEO spacecraft for space debris mitigation. R. Hoyt y R. Forward. Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica, documento AIAA 00-0329, 2000. Disponible en **www.tethers.com/papers/TTReno00.pdf**

Geosynchronous large debris reorbiter: Challengs and prospects. H. Schaub y D. F. Moorer Jr. Sociedad Americana de Astronáutica, documento AAS 10-311, 2010. Disponible en **hanspeterschaub.info/Papers/Schaub2010.pdf**

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Condicionales y probabilidades

Una propuesta alternativa para entender el significado de los enunciados condicionales

En una columna anterior [«¿Cómo entender los condicionales?»; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013] analizamos los problemas que surgían al intentar comprender el significado de los enunciados de la forma:

> Si llueve, saldré a la calle con paraguas.

¿Cuándo es verdadero y cuándo falso un enunciado como este? A pesar de su inocente aspecto, entonces vimos que la única tabla de verdad que parecía permitirnos la lógica de enunciados implicaba resultados absurdos, como la posibilidad de «demostrar» la inexistencia de Dios a partir de hechos intrascendentes. Al final, nos vimos abocados a concluir que tal vez no fuese posible asignar valores de verdad a los enunciados condicionales; una posibilidad que, sin embargo, implicaría consecuencias muy drásticas para la teoría del lenguaje.

No obstante, existe una estrategia distinta para abordar el problema; una que no consideramos en la columna anterior. Este nuevo enfoque se basa en la teoría de la probabilidad y puede enunciarse como sigue:

> *El significado de un enunciado de la forma «si φ, entonces ψ» debería ser tal que la probabilidad de que sea verdadero coincida con la probabilidad de que ψ sea verdadero toda vez que lo es φ.*

Nos encontramos ante una propuesta de alta alcurnia. Tal vez una de sus primeras formulaciones se deba al matemático y filósofo Frank Ramsey (el padre de la teoría de Ramsey, a la que también hemos hecho referencia en otras columnas), si bien la presentación más clara apareció en 1970, en un artículo de Robert Stalnaker, filósofo del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Desde entonces, la estrategia probabilística para entender los condicionales ha suscitado el interés de numerosos investigadores.

Entender bien esta propuesta requiere analizar con cuidado ciertos conceptos. Para ello, antes tendremos que recordar algunas definiciones básicas y tomar un pequeño desvío.

Funciones de probabilidad

Consideremos un conjunto finito de posibilidades, al que llamaremos S. Una función de probabilidad sobre S es una función P que, a cada elemento de S, le asigna un número entre 0 y 1, con la condición de que la suma de todos ellos sea igual a la unidad:

$$\sum_{s\in S} P(s) = 1 \,.$$

Una vez que disponemos de una función de probabilidad definida para cada uno de los elementos de S, podemos extenderla con facilidad a todos los subconjuntos de S. Para ello, dado $E \subseteq S$, basta con definir:

$$P(E) = \sum_{s\in E} P(s) \,.$$

Resulta sencillo ver que, si generalizamos P de esta manera, obtenemos una función que satisface las siguientes propiedades:

$$P(S) = 1 \,,$$
$$P(E^c) = 1 - P(E) \,,$$
$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \text{ si } A \cap B = \varnothing \,,$$

donde E^c es el complemento de E en S (es decir, todas las posibilidades que no están incluidas en E) y A y B son subconjuntos de S.

A modo de ejemplo, pensemos en el conjunto de resultados posibles al lanzar un dado. En tal caso podemos representar nuestro conjunto de posibilidades mediante $S_D = \{s_1, s_2, \ldots, s_6\}$, donde s_i corresponde a la posibilidad de que el dado caiga en el número i.

La manera natural de definir nuestra función de probabilidad es:

$$P(s_i) = 1/6 \text{ para todo } i \,.$$

Las propiedades anteriores implican, por ejemplo, que la probabilidad del conjunto $\{s_3, s_4\}$ ha de ser 1/3, y que la probabilidad de $\{s_5\}\cap\{s_2, s_4, s_6\}$ tiene que ser 0. (Esto último se debe a que el conjunto considerado corresponde al conjunto vacío y a que $S = \varnothing \cup S$, por lo que $P(\varnothing) + P(S) = 1$.)

En general, podemos pensar en cada subconjunto E de S como en un evento: aquel que ocurre cuando tiene lugar una de las posibilidades incluidas en E. Así, en el caso del dado, el subconjunto:

$$E_p = \{s_2, s_4, s_6\}$$

correspondería al evento «obtener un número par».

Probabilidades condicionadas

La probabilidad de un evento concreto puede depender de qué otros eventos hayan ocurrido con anterioridad. Supongamos que la probabilidad media de que Ernesto se resfríe en un mes de noviembre es igual a 0,65. Parece claro que si todos sus amigos se han acatarrado en la última semana de octubre, la probabilidad debería ser mayor que 0,65.

Si A y B denotan dos conjuntos de posibilidades, llamaremos $P(A|B)$ a la probabilidad de que *ocurra A dado B*; es decir, de que tenga lugar el suceso A cuando B es cierto. Recordemos que la expresión para calcular una probabilidad condicionada viene dada por:

$$P(A\,|\,B) = \frac{P(A\cap B)}{P(B)}$$

(siempre que $P(B) \neq 0$; en caso contrario, diremos que la probabilidad de «A dado B» no está bien definida).

De la expresión anterior resulta inmediato ver que $P(A\,|\,B)$ proporciona

un número comprendido entre 0 y 1. Es más, si $P(A) > 0$, puede demostrarse que la función P_A que asigna a cada posibilidad s el valor $P(\{s\}|A)$ es una función de probabilidad.

Volvamos a nuestro dado. La probabilidad de obtener un número par corresponde a:

$$P(E_p) = P(s_2) + P(s_4) + P(s_6) = 1/2 \,.$$

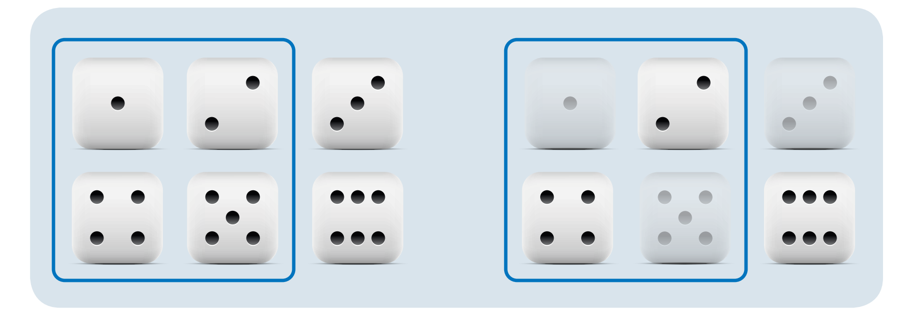
Así pues, la probabilidad de que el dado caiga en 6 cuando lo hace en un número par es:

$$P(s_6 \,|\, E_p) = \frac{P(\{s_6\} \cap E_p)}{P(E_p)} = \frac{P(\{s_6\})}{P(E_p)} = \frac{1/6}{1/2} = 1/3 \,.$$

Consideremos ahora el siguiente enunciado condicional:

> Si el dado cae en un número par, lo hará en 6.

¿Es posible asignarle un significado que, tal y como propone la estrategia probabilística, refleje de alguna manera el valor de la probabilidad condicionada que acabamos de calcular?



DEL CÁLCULO DE PROBABILIDADES A LA LÓGICA: En general, la probabilidad $P(A)$ de un conjunto A de posibilidades viene dada por la proporción de A con respecto al conjunto de casos considerados. En el caso de los lanzamientos de un dado, la probabilidad de obtener un número perteneciente al conjunto $\{1,2,4,5\}$ es, por tanto, $4/6 = 2/3$ (*izquierda*). Las probabilidades condicionadas se calculan con relación a un conjunto de sucesos previo. Así, la probabilidad de «obtener un número par cuando el resultado pertenece al conjunto $\{1,2,4,5\}$», $P(\{2,4,6\} \mid \{1,2,4,5\})$, viene dada por $P(\{2,4,6\} \cap \{1,2,4,5\})/P(\{1,2,4,5\}) = (2/6)/(4/6) = 1/2$ (*derecha*). Una línea de investigación en lógica busca entender el significado de los enunciados condicionales a partir de su relación con las probabilidades condicionadas.

THINKSTOCK/1001 (*dados*)

Fragmentos simples del castellano

Para llevar nuestra tarea a buen puerto, primero tenemos que establecer una conexión formal entre la teoría de la probabilidad y los enunciados formulados en el lenguaje natural.

Comencemos por considerar un conjunto finito X de enunciados del castellano. Un *fragmento simple* del castellano para X, F_X, se define como el menor conjunto posible de enunciados del castellano que incluye a todos los enunciados de X y que, además, satisface las siguientes propiedades:

- Si φ es un enunciado de F_X, entonces $\neg\varphi$ está en F_X.
- Si φ y ψ son enunciados de F_X, entonces $\varphi \vee \psi$ está en F_X.
- Si φ y ψ son enunciados de F_X, entonces $\varphi \wedge \psi$ está en F_X.

Aquí $\neg\varphi$ denota la negación de φ; $\varphi \vee \psi$ abrevia la disyunción de ambos enunciados («φ o ψ»), y $\varphi \wedge \psi$, su conjunción («φ y ψ»).

Pensemos ahora en el significado de un enunciado como en un conjunto de posibilidades: estableceremos que el significado de φ viene dado por el conjunto $[\varphi]$ de posibilidades en las que φ es verdadero. Si conocemos el significado de un conjunto de enunciados X, podremos entender el significado de cualquier conjunto del fragmento simple para X, ya que:

$$[\neg\varphi] = [\varphi]^c \,,$$
$$[\varphi \vee \psi] = [\varphi] \cup [\psi] \,,$$
$$[\varphi \wedge \psi] = [\varphi] \cap [\psi] \,.$$

Examinemos un ejemplo sencillo. Partamos del conjunto de enunciados básicos con la forma:

> (d_i) El dado caerá en i,

donde i denota un número entre 1 y 6. El fragmento simple del castellano para este conjunto, al que llamaremos F_D, contiene todos los (d_i) y, además, enunciados como los siguientes:

> El dado caerá en 1 o en 2 ($d_1 \vee d_2$).
> El dado no caerá en 5 ($\neg d_5$).
> No es cierto que el dado caerá en 3 y en 4 ($\neg(d_3 \wedge d_4)$).

Sin embargo, F_D no incluye enunciados como:

> El dado es azul.
> Ernesto quiere que el dado caiga en 5.

Ahora, para relacionar estos enunciados del lenguaje natural con probabilidades, deberíamos asignar a cada enunciado de F_D un subconjunto de S_D. Para que todo funcione, basta con fijar:

$$[d_i] = \{s_i\} \,.$$

Este pequeño ejercicio nos asegura que podemos hablar con propiedad de la probabilidad de que un enunciado φ de F_D sea verdadero: dicha probabilidad será igual a la del conjunto de posibilidades $[\varphi]$.

¿Qué sucede si extendemos este formalismo para incluir enunciados condicionales?

La probabilidad de un condicional

Al igual que antes, partiremos de un conjunto X de enunciados y definiremos el *fragmento simple con condicionales* correspondiente como el menor conjunto de enunciados F_{CX} que contiene todos los enunciados de X, que satisface las mismas propiedades que F_X y que, además, cumple la siguiente condición:

> Si φ y ψ están en F_{CX}, entonces $\varphi \rightarrow \psi$ está en F_{CX},

donde $\varphi \rightarrow \psi$ abrevia el enunciado condicional cuyo antecedente es φ y cuyo consecuente es ψ.

Si extendemos F_D para construir su fragmento simple con condicionales, obtendremos enunciados como:

$$(d_2 \vee d_4 \vee d_6) \rightarrow d_6 \,,$$
$$((d_2 \vee d_4 \vee d_6) \rightarrow d_6) \rightarrow \neg d_4 \,.$$

Uno de los problemas abiertos en el estudio formal de la significación es el siguiente: ¿de qué manera depende el significado de $\varphi \rightarrow \psi$ de los significados de φ y de ψ? En términos más abstractos, este problema consiste en encontrar una función $f_\rightarrow$ que, dado un par de conjuntos de posibilidades $[\varphi]$ y $[\psi]$, les asigne otro conjunto de posibilidades tal que $f_\rightarrow([\varphi],[\psi]) = [\varphi \rightarrow \psi]$.

La estrategia probabilística nos sugiere que, para toda función de probabilidad P, debería cumplirse la siguiente propiedad: $P([\varphi \to \psi]) = P([\psi] \mid [\varphi])$.

Por tanto, nuestro objetivo es hallar una función, a la que llamaremos $\Rrightarrow$, que a cada par de conjuntos de posibilidades A y B les asigne otro conjunto de posibilidades, $A \Rrightarrow B$, tal que:

(1) Para toda función de probabilidad P, si $P(A) > 0, P(A \Rrightarrow B) = P(B|A)$.

Llamaremos *condicional de probabilidad* a toda función $\Rrightarrow$ entre conjuntos de posibilidades que satisfaga (1). Ahora solo tenemos que encontrar una función de este tipo.

¿Existen los condicionales de probabilidad?

Si $\Rrightarrow$ es un condicional de probabilidad, puede demostrarse que, si $P(A \cap B) > 0$, la definición (1) implica que:

(2) $P(A \Rrightarrow (B \Rrightarrow C)) = P(A \cap B \Rrightarrow C)$.

Para ver por qué, recordemos que, para todo A, la función P_A que asigna a cada B el valor $P(B|A)$ es una función de probabilidad. Por tanto:

$$P(A \Rrightarrow (B \Rrightarrow C)) = P_A(B \Rrightarrow C) = P_A(C|B) .$$

Ahora bien:

$$P_A(C|B) = \frac{P_A(C \cap B)}{P_A(B)} = \frac{P(C \cap B|A)}{P(B|A)} = \frac{P(C \cap B \cap A)/P(A)}{P(B \cap A)/P(A)} = P(C|B \cap A),$$

de donde, sin más que volver a usar (1), llegamos a $P(A \cap B \Rrightarrow C)$.

La expresión (2) parece más que razonable. Por ejemplo, todos diríamos que el enunciado:

$$(d_2 \vee d_4 \vee d_6) \to (\neg(d_2 \vee d_4) \to d_6)$$

(«si el dado cae en un número par, entonces, si no cae en 2 o en 4, caerá en 6») es equivalente a:

$$((d_2 \vee d_4 \vee d_6) \wedge \neg(d_2 \vee d_4)) \to d_6$$

(«si el dado cae en un número par y no lo hace en 2 o en 4, caerá en 6»). Por tanto, las probabilidades asociadas a cada uno de ellos deberían ser iguales.

Sin embargo, este pequeño resultado causa enormes inconvenientes. El primero de ellos fue señalado en los años setenta por David Lewis, filósofo de la Universidad de Princeton. En 1976, Lewis publicó un artículo que cayó como una bomba sobre lo que prometía ser una solución definitiva al problema de entender los condicionales. En los quince años siguientes, investigadores como Alan Hájek, de la Universidad Nacional Australiana, Ned Hall, de Harvard, y el mismo Stalnaker generalizaron los resultados de Lewis hasta tal punto que la estrategia probabilística parecía abocada al fracaso.

Una buena ilustración de la serie de problemas a los que nos enfrentamos la hallamos en el primero de los resultados de Lewis. Aunque no es el más grave, sí es el que requiere menos nociones auxiliares.

Observemos primero que, si $P(A)$ y $P(A^c)$ son ambas distintas de 0, entonces tenemos que, para todo B:

$$P(B) = P(B|A)P(A) + P(B|A^c)P(A^c) .$$

En particular:

$$P(A \Rrightarrow C) = P(A \Rrightarrow C|C)P(C) + P(A \Rrightarrow C|C^c)P(C^c) .$$

Ahora bien, sin más que aplicar (1) y (2), podemos comprobar fácilmente que:

$$P(A \Rrightarrow C|C) = P(C|C \cap A) .$$

Y, de igual modo:

$$P(A \Rrightarrow C|C^c) = P(C|C^c \cap A) .$$

Las igualdades anteriores solo exigen que $P(A \cap C)$ y $P(A \cap C^c)$ sean ambas mayores que cero. Ahora bien, notemos que:

$$P(C|C \cap A) = 1 ,$$
$$P(C|C^c \cap A) = 0 .$$

De modo que hemos demostrado que, si $\Rrightarrow$ es un condicional de probabilidad y si $P(A \cap C)$ y $P(A \cap C^c)$ son distintas de cero:

$$P(A \Rrightarrow C) = P(C|A) = P(C) .$$

El problema radica en que existen funciones de probabilidad tales que, para algún A y C, $P(A \cap C)$ y $P(A \cap C^c)$ son distintos de cero pero $P(C|A) \neq P(C)$.

Por ejemplo, recordemos la función P que definimos sobre S_D. Esta satisface que $P(E_p \cap \{s_6\})$ y $P(E_p \cap \{s_6\}^c)$ son ambas distintas de cero. Sin embargo, vimos que $P(\{s_6\}|E_p) = 1/3$ y que $P(\{s_6\}) = 1/6$; es decir, $P(\{s_6\}|E_p) \neq P(\{s_6\})$. (¡Como cabría esperar! La probabilidad de obtener un 6 cuando el dado cae en un número par no debería ser igual a la probabilidad de obtener un 6 sin más.)

Este contraejemplo demuestra que no puede existir ninguna función $\Rrightarrow$ que satisfaga la condición (1) para toda función de probabilidad.

Es importante destacar que no hemos supuesto absolutamente nada sobre $\Rrightarrow$. Desde un punto de vista abstracto, el resultado de Lewis nos permite comprobar que no puede existir ninguna función $f_\to$ que asigne a cada par de conjuntos de posibilidades A y B un conjunto $f_\to(A, B)$ tal que $P(f_\to(A, B)) = P(B|A)$ para toda función de probabilidad P.

A pesar de los resultados anteriores, no sería justo decir que la estrategia probabilística carece de mérito. La intuición que la avala parece tan acertada que una de las áreas de investigación en el estudio de los condicionales se dedica esencialmente a buscar maneras de escapar a este tipo de resultados.

Una de las opciones que ha recibido más atención, entre cuyos proponentes se encuentran el fallecido Ernest Adams, de la Universidad de California en Berkeley, y Vann McGee, del MIT, consiste en suponer que no todo enunciado de un fragmento simple con condicionales posee un significado claro. No es obvio, por ejemplo, que haya un enunciado en castellano que corresponda a:

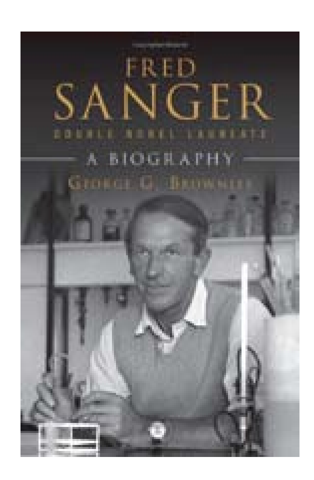
$$((d_2 \vee d_4 \vee d_6) \to d_6) \to \neg d_4 .$$

(Intente formular un condicional en castellano cuyo antecedente sea un condicional. ¡No es fácil!)

Tal vez la mejor solución al problema de entender los enunciados condicionales requiera abandonar la idea de que, para todo par de enunciados del castellano, φ y ψ, exista un enunciado que corresponda al condicional $\varphi \to \psi$. O quizá tengamos que seguir a Dorothy Edgington, de la Universidad de Londres, y renunciar a que el significado de dichos condicionales pueda entenderse en términos de conjuntos de posibilidades. De ser el caso, tal vez la estrategia sugerida por (1) nos permita algún día entender cómo funcionan los enunciados condicionales. De cualquier forma, aún queda un largo camino por delante.

PARA SABER MÁS

El resultado principal de esta columna aparece en el artículo clásico de David Lewis **Probabilities of conditionals and conditional probabilities** (*The Philosophical Review*, vol. 85, n.º 3, págs. 297-315, julio de 1976). Un intento de restringir el lenguaje a enunciados cuyos antecedentes no sean enunciados condicionales se debe a Vann McGee: **Conditional probabilities and compounds of conditionals** (*The Philosophical Review*, vol. 98, n.º 4, págs. 485-541, octubre de 1989). Un análisis accesible de este tipo de resultados aparece en **A philosophical guide to conditionals**, de Jonathan Bennett (Oxford University Press, 2003).



FRED SANGER, DOUBLE NOBEL LAUREATE. A BIOGRAPHY

Por George G. Brownlee. Cambridge University Press, Cambridge, 2014.

Sanger

Nóbel por la secuencia de proteínas, nóbel por la secuencia nucleotídica

Frederic Sanger nació el 13 de agosto de 1918 en Rendcombe, Gloucestershire. Su padre era médico, profesión que desempeñó en el servicio de una misión anglicana en China, donde fundó además una escuela para niños pobres, hasta que volvió a Inglaterra por enfermedad. Más tarde se hizo cuáquero, confesión en que creció Sanger, cuya madre pertenecía a una acaudalada familia de la industria del algodón.

A los nueve años, en 1927, entró en la Escuela privada Downs (Malvern), dirigida por cuáqueros. De allí pasó, en 1932, a la Escuela Bryanston (Dorset), donde seguían el sistema Dalton y se respiraba una atmósfera más liberal. Con un buen expediente académico fue admitido, en 1936, en el Colegio St. John's de Cambridge para cursar la carrera de ciencias naturales. El plan de estudios comprendía la enseñanza de física, química, bioquímica y matemática. Le costaron en un comienzo física y matemática. Pasado el ecuador de la carrera, se centró en la bioquímica en el departamento de Gowland Hopkins, quien había reunido un plantel de científicos tan competentes como polémicos: J. B. S. Haldane, Malcolm Dixon, Bill Pirie, Joseph Needham y Ernest Baldwin.

Fiel a su formación cuáquera, militó por entonces en movimientos pacifistas. Fue declarado objetor de conciencia y exento del servicio de armas durante la Segunda Guerra Mundial. En 1940 comenzó el doctorado, bajo la tutoría de N. W. Pirie. Optó por investigar sobre la posibilidad de proteínas vegetales, tema que abandonó pronto, al dejar Pirie el departamento. Con Albert Neuberger por nuevo director de tesis, Sanger abordó el estudio del metabolismo de la lisina en los animales, tesis que en 1943 le valió el título de doctor. Tres años antes había contraído matrimonio con Joan Howe.

Se incardinó de inmediato en el grupo de Charles Chibnall, químico experto en proteínas, que acababa de ocupar la cátedra del departamento de bioquímica. En 1943, los principios de la química de proteínas estaban firmemente establecidos. Se sabía que todas las proteínas se construían a partir de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos para formar largas cadenas. Pero se ignoraba de qué forma se disponían los aminoácidos. En la mayoría de las proteínas de mamíferos hay veinte aminoácidos diferentes. Por procedimientos analíticos se podía afirmar cuántos residuos de cada uno había en una proteína determinada. Pero nada se sabía del orden en que tales restos se disponían. Ese orden importaba, pues, aunque todas las proteínas contenían aproximadamente los mismos aminoácidos, divergían en sus propiedades físicas y biológicas.

La teoría más ampliamente debatida era la de Max Bergmann y Carl G. Niemann, quienes sugerían que los aminoácidos se disponían de forma periódica: los residuos de un tipo de aminoácido se presentaban a intervalos regulares a lo largo de la cadena. En el otro extremo estaban los que sugerían que una proteína pura no era una entidad química individual, sino que constaba de una mezcla aleatoria de individuos parecidos.

Si Neuberger le enseñó a investigar, Chibnall le despertó el interés por las proteínas. Chibnall, que había realizado ya algún trabajo sobre la composición aminoacídica de la insulina bovina, le sugirió a Sanger que empezara por grupos de aminoácidos de esta proteína. Se sabía que poseía una constitución bastante sencilla y que carecía de dos de los aminoácidos más comunes: triptófano y metionina. El grupo de Chibnall había estudiado la composición aminoacídica de la insulina bovina. Chibnall animó a Sanger a estudiar los grupos terminales de la molécula porque había descubierto que esta abundaba en grupos terminales α-amino libres, lo que indicaba la presencia de grupos α-amino libres en el extremo de cadenas cortas. (La insulina era una proteína de gran interés médico debido al descubrimiento de Banting y Best, a comienzos de los años veinte, de que valía para tratar la diabetes, una enfermedad letal en aquel momento.)

A Sanger, hijo de médico, le atrajo la idea. En ese tiempo, el peso molecular de la insulina estaba sobreestimado; creíase que constaba de cuatro cadenas. Había muchos puntos oscuros, faltaba metodología y no pocos científicos habían abandonado, convencidos de la imposibilidad de establecer la secuencia de la molécula. Pero eso no arredró a Sanger, quien dedicó una docena de años, de 1944 a 1955. Su tenacidad se vio coronada con el éxito y al fin secuenció los 51 aminoácidos de las dos cadenas de insulina, A y B, por métodos ideados por él mismo.

¿Había un patrón regular de aminoácidos? ¿Formaban las secuencias un anillo? ¿O creaban una secuencia lineal con un extremo N-terminal y un extremo C-terminal separados? Sanger demostraría, con la insulina, que las proteínas tenían una estructura específica, una composición química definida. Para lograrlo, se sirvió del «reactivo de Sanger»: el fluorodinitrobenceno (FDNB), un derivado amarillento del benceno, reacciona con los grupos amino expuestos de la proteína y, en particular, con el grupo amino N-terminal de un extremo de la cadena. (La coloración facilitó la identificación de los 16 DNB-aminoácidos de insulina.)

Empezó añadiendo a una solución de insulina la enzima tripsina (que degrada la proteína). Los péptidos se fraccionaban sobre una hoja de papel vegetal: primero por electroforesis en una dirección, y luego, por cromatografía, en la otra dirección perpendicular. Según la solubilidad y la carga eléctrica, los fragmentos de insulina, detectados con ninhidrina, se trasladaron a posiciones distintas del papel, creando un patrón característico, que Sanger denominó «huellas dactilares» porque permiten identificar cada proteína. Al reagrupar los fragmentos, determinó la secuencia aminoacídica de las dos cadenas de la insulina. Ese trabajo le valió el nóbel de química en 1958.

El trabajo de Sanger estimuló la investigación sobre otras proteínas, que no tardaron en secuenciarse. El modelo resultó

determinante para la hipótesis secuencial posterior de Crick sobre la codificación de las proteínas por el ADN.

Desde 1951, Sanger era miembro externo del Consejo de Investigación Médica, a cuyo laboratorio de biología molecular se trasladó en 1962. Fue designado jefe de la división de química de proteínas. Describió el decenio transcurrido entre 1955 y 1964 como los años de vacas flacas, por sus escasas publicaciones en ese intervalo. Fue un período de transición en el que anduvo ensayando con nuevas ideas sobre la secuenciación de proteínas.

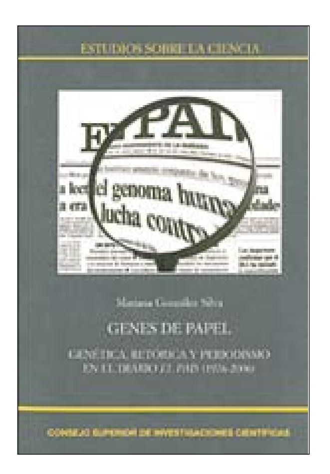
Al poco de la descripción de Sanger de la secuencia de la insulina en 1955, Vernon Ingram demostró que una mutación en un gen causaba un cambio en la secuencia de la proteína. Ese descubrimiento surgió en el marco de la investigación sobre moléculas de hemoglobina anómala que causaban la anemia falciforme. Aplicando el método de Sanger, Ingram observó que resultaba un tipo particular anómalo de hemoglobina a partir de la sustitución de un ácido glutámico por valina. No cabía duda de que el ADN cifraba la secuencia de aminoácidos de la proteína.

Sanger empezó a considerar la posibilidad de secuenciar las moléculas de ARN. Empezó por el ARN, y no por el ADN, porque los únicos ácidos nucleicos cortos disponibles eran los de ARN. El trabajo con ADN se hallaba lejos del alcance de los investigadores a comienzos de los años sesenta. El cambio de proteínas a ARN era natural. Antes del descubrimiento de los ARN de transferencia (ARNt) no parecía que hubiera forma de trabajar en ácidos nucleicos. El ARNt era bastante corto (unos 80 nucleótidos), abordable para una futura secuenciación, aunque planteaba la dificultad de presentarse como una mezcla de una veintena de moléculas estrechamente relacionadas. Iba a costar purificarlo. Sanger no terminó la secuencia de un ARNt, el de la fenilalanina, hasta 1969.

Tras su investigación con el ARN, en cuya virtud la información génica se traduce en secuencia proteínica, se decidió a dar el gran salto: secuenciar los propios genes. Desarrolló un método que se apoyaba en enzimas para copiar fragmentos de ADN. Se prepararon cuatro reacciones, cada una alimentada por los cuatro nucleótidos (A, T, C y G), marcada una de ellas con átomos radiactivos. Cada reacción contenía una versión modificada de las bases A, T, C o G. Ahora bien, esos «terminales de cadena» no permitían el crecimiento de la hebra de ADN, una vez se habían ellos incorporado. Se iban separando las copias interrumpidas de acuerdo con su tamaño en geles por una corriente eléctrica inducida y se dejaban expuestos en una película fotográfica. Las bandas oscuras generadas revelaban la longitud de la copia de ADN; permitía que la secuencia se leyera sin dificultad. Mediante la combinación de fragmentos de ADN se infería la secuencia del ADN mayor.

Como recordaba su colaborador y nóbel John Walker, la robustez del método de Sanger quedó demostrada en la secuencia de genomas de tamaño creciente, desde un simple virus bacteriano (5386 nucleótidos) en 1997 hasta el genoma del bacteriófago lambda (48.502 nucleótidos) en 1982. Asimismo, permitió identificar mutaciones causantes de enfermedades. Y revolucionó nuestra capacidad de entender y diagnosticar una patología. Condujo así a una nueva era de la medicina genética. Por su método para determinar la secuencia de los ácidos nucleicos recibió un segundo premio Nobel de química en 1980, concedido a Paulo Berg y a Sanger a medias con Walter Gilbert. Este trabajo fue base fundamental para empresas tan ambiciosas como el Proyecto Genoma Humano. Murió el 19 de noviembre de 2013, en Cambridge.

—Luis Alonso



GENES DE PAPEL: GENÉTICA, RETÓRICA Y PERIODISMO EN EL DIARIO *EL PAÍS* (1976-2006)

Por Matiana González Silva. Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, 2014.

Determinismo genético y periodismo

Hacia un nuevo modelo de comunicación científica

La investigación genética tuvo un lugar privilegiado en las páginas del diario *El País* durante la década de los noventa del siglo xx. El Proyecto Genoma Humano estaba en pleno desarrollo y proporcionó una imagen enormemente prometedora de esta rama de la ciencia. Se pensaba que, mediante la elucidación de la secuencia química de nuestro ADN, sería posible conocer el funcionamiento de nuestros genes y corregir sus defectos en enfermedades hereditarias. Sin embargo, como apunta en esta obra Matiana González Silva, profesora asociada del Centro de Historia de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Barcelona, el auge de la genética en *El País* fue un fenómeno coyuntural. Durante los años fundacionales del diario (1976-89), los genes se consideraban un factor más, desconocido y no privilegiado, en la salud y el comportamiento humanos. Una vez secuenciado nuestro genoma (2001), el incumplimiento de gran parte de las expectativas llevó a *El País* a aproximarse a la genética con mayor cautela.

Esas tres etapas (de desconocimiento, eclosión y cautela) informan el argumento de González Silva en *Genes de papel*. Basado en su tesis doctoral, este libro constituye un exhaustivo análisis de las informaciones sobre genética humana publicadas en *El País* desde su primer número, en mayo de 1976, hasta 2006, cinco años después de la publicación de los resultados del Proyecto Genoma Humano. Los casi dos mil textos analizados reflejan cómo la importancia que se otorgó a los genes varió en función de las circunstancias científicas y sociopolíticas de la España de la época. Al propio tiempo, esta variación transformó el modelo comunicativo de *El País* en lo relativo a la difusión pública de la ciencia. El resultado es una obra incisiva, en la que la investigación académica en historia y comunicación científica se combinan para ilustrar de forma crítica las limitaciones y posibles alternativas al modelo dominante de popularización de la ciencia. Sin embargo, en ocasiones se echa de menos una reflexión más amplia del contexto científico y periodístico in-

ternacional en el que *El País* difundió la genética.

La obra arranca con una introducción que nos acerca a los aspectos más relevantes de la historia de la genética humana y del diario *El País* dentro de la Transición entre la dictadura de Franco y la España democrática. Su labor de síntesis es encomiable: analiza y articula una amplia literatura académica en historia de la biología, del periodismo y de la Transición política española, sin caer en generalizaciones ni omisiones. Se ofrece también una panorámica de los distintos modelos de comunicación científica. Muestra el modo en que, a partir de la década de 1980, la comprensión social de la ciencia (*public understanding of science*), promovida por instituciones anglosajonas, se erigió como el paradigma dominante. Este modelo buscaba acercar la ciencia al público y mejorar la imagen de la misma, de manera que los ciudadanos no cuestionasen la verdad o los efectos beneficiosos de lo que se hacía en el laboratorio. La autora demuestra que la historia de la genética en *El País* se corresponde con un ascenso de este modelo, en detrimento de otros que, en la línea del entusiasmo democrático de los primeros años del diario, buscaban acercar la ciencia de manera más crítica y participativa.

En la primera parte del libro se ilustra cómo *El País* dio voz, de forma cambiante, a un amplio abanico de actores relacionados con la investigación genética. En los primeros años, a finales de los setenta y principios de los ochenta, sus páginas se hacían eco no solo de científicos, sino también de filósofos y colectivos sociales involucrados en el diseño de las primeras políticas democráticas de salud pública. Los genes se presentaban como un elemento más «entre los diferentes factores que contribuían a los procesos patológicos» (pág. 80). Dentro de esta visión, el determinismo genético y las posturas biologicistas se identificaban con la derecha política y, por tanto, se consideraban contrarias a la línea editorial del periódico. Sin embargo, conforme avanzaban los ochenta, la genética fue ganando peso en España y una nueva hornada de investigadores reclamó «cada vez más voz». Sus intereses se vieron beneficiados por el ascenso, dentro del diario, de reporteros especializados, formados en el mundo anglosajón y que admiraban el modelo del *public understanding of science*, guiado por el criterio de los científicos. Esto contribuyó a que la genética, y la investigación científica en general, se presentasen cada vez más como «una actividad unívoca, universal e incuestionable, que avanzaba imparable y con independencia de cualquier elemento mundano, como las políticas públicas o las legislaciones nacionales» (pág. 98).

Ese nuevo modelo, proclive a reflejar los hallazgos tal y como los relataban los científicos y excluyendo otras voces, alcanzó su cénit en los noventa. El arranque del Proyecto Genoma Humano sirvió como motor para el dominio de la genética en *El País*, pero no tanto por la participación española en esta iniciativa —que resultó testimonial— como por el uso que una influyente comunidad local de genetistas médicos hizo de sus resultados. Esta distinción entre el Proyecto Genoma Humano en sí y su apropiación por los científicos españoles constituye la aportación más valiosa de González Silva. La autora demuestra cómo la «situación periférica» de España permitió a *El País* conservar parte de su modelo comunicativo original cuando informaba del Proyecto Genoma Humano, analizando y discutiendo críticamente las dimensiones políticas, económicas y sociales del mismo (pág. 322). Sin embargo, los genetistas médicos españoles lograron establecer una relación simbiótica con los reporteros científicos y llevaron al diario a informar de manera cada vez más determinista sobre las conexiones entre genes, enfermedad y comportamiento.

Esa simbiosis se refleja en la segunda parte del libro, donde se ahonda en el uso que las distintas comunidades relacionadas con la genética hicieron de *El País*. A lo largo de los ochenta y noventa, los actores más críticos con el determinismo genético, que antes gozaban de un amplio protagonismo, vieron relegadas sus contribuciones a la sección de *Cartas al director*. Por el contrario, los incipientes genetistas españoles lograron instrumentalizar la cobertura informativa del diario y adecuarla a sus intereses. El Proyecto Genoma Humano sirvió así para impulsar la implantación del diagnóstico genético en España y reclamar financiación para esta rama de la biomedicina, que se veía especialmente adecuada para explotar el potencial médico de la secuencia. El éxito del Proyecto resultó aparente en los años inmediatamente posteriores a la publicación de sus resultados (2001), pero, conforme pasaba el tiempo, las expectativas despertadas no llegaron a cumplirse, al menos a la velocidad esperada [*véase* «Revolución aplazada», por Stephen S. Hall; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010]. Esto llevó a una reaparición de voces críticas con la biologización en las páginas de *El País* y a informaciones en las que la complejidad de las interacciones entre genes en procesos como el comportamiento o la enfermedad cobraban «cada vez más relevancia» (pág. 235).

El ciclo histórico de descubrimiento, auge y desencanto del papel de los genes en *El País* permite a González Silva concluir con una lectura crítica de la práctica actual de la comunicación científica. La autora se opone de forma tajante a la idea de que los medios de masas deben únicamente informar de resultados contrastados, abogando por «proveer al público de nuevos elementos que permitan comprender mejor cómo opera la actividad científica». Así, al saber que «aunque alguien no comprenda cada detalle técnico siempre tiene derecho de opinar, los ciudadanos se involucrarían en los temas científicos y dejarían de ver la ciencia y a los científicos como unos entes de naturaleza casi mágica» (págs. 334 y 336). Esta conclusión, y el uso de la historia de la ciencia para respaldarla, constituye la principal riqueza del libro. El análisis histórico permite a González Silva mostrar las flaquezas de un modelo comunicativo (el *public understanding of science*) que se agota tras más de treinta años de dominio.

Uno de los aspectos más fascinantes de los procesos históricos que se describen en *Genes de papel* es el modo en que las técnicas genéticas se entrelazan con dinámicas sociopolíticas más amplias. Aquí, el análisis de González Silva peca a veces de compartimentalizar en exceso estos procesos, refiriéndose a los «aspectos técnicos» de la genética como categoría que puede detectarse en las informaciones de *El País*. Si tecnología y sociedad, como acertadamente apunta la autora, son dimensiones inseparables, no queda claro cómo pueden identificarse esos aspectos técnicos en las páginas de un diario. Esta separación, junto con la ausencia de un contexto periodístico internacional más detallado en el que se aprecien mejor los efectos de la situación periférica de *El País*, constituye el aspecto más mejorable de la obra. Quizá la autora pueda explorarlo en una segunda parte, que a buen seguro los lectores aguardarán con impaciencia.

—Miguel García-Sancho
Universidad de Edimburgo

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

- **MyC 1:** Conciencia y libre albedrío
- **MyC 2:** Inteligencia y creatividad
- **MyC 3:** Placer y amor
- **MyC 4:** Esquizofrenia
- **MyC 5:** Pensamiento y lenguaje
- **MyC 6:** Origen del dolor
- **MyC 7:** Varón o mujer: cuestión de simetría
- **MyC 8:** Paradoja del samaritano
- **MyC 9:** Niños hiperactivos
- **MyC 10:** El efecto placebo
- **MyC 11:** Creatividad
- **MyC 12:** Neurología de la religión
- **MyC 13:** Emociones musicales
- **MyC 14:** Memoria autobiográfica
- **MyC 15:** Aprendizaje con medios virtuales
- **MyC 16:** Inteligencia emocional
- **MyC 17:** Cuidados paliativos
- **MyC 18:** Freud
- **MyC 19:** Lenguaje corporal
- **MyC 20:** Aprender a hablar
- **MyC 21:** Pubertad
- **MyC 22:** Las raíces de la violencia
- **MyC 23:** El descubrimiento del otro
- **MyC 24:** Psicología e inmigración
- **MyC 25:** Pensamiento mágico
- **MyC 26:** El cerebro adolescente
- **MyC 27:** Psicograma del terror
- **MyC 28:** Sibaritismo inteligente
- **MyC 29:** Cerebro senescente
- **MyC 30:** Toma de decisiones
- **MyC 31:** Psicología de la gestación
- **MyC 32:** Neuroética
- **MyC 33:** Inapetencia sexual
- **MyC 34:** Las emociones *
- **MyC 35:** La verdad sobre la mentira
- **MyC 36:** Psicología de la risa
- **MyC 37:** Alucinaciones
- **MyC 38:** Neuroeconomía
- **MyC 39:** Psicología del éxito
- **MyC 40:** El poder de la cultura
- **MyC 41:** Dormir para aprender
- **MyC 42:** Marcapasos cerebrales
- **MyC 43:** Deconstrucción de la memoria *
- **MyC 44:** Luces y sombras de la neurodidáctica
- **MyC 45:** Biología de la religión
- **MyC 46:** ¡A jugar!
- **MyC 47:** Neurobiología de la lectura
- **MyC 48:** Redes sociales
- **MyC 49:** Presiones extremas
- **MyC 50:** Trabajo y felicidad
- **MyC 51:** La percepción del tiempo
- **MyC 52:** Claves de la motivación
- **MyC 53:** Neuropsicología urbana
- **MyC 54:** Naturaleza y psique
- **MyC 55:** Neuropsicología del yo
- **MyC 56:** Psiquiatría personalizada
- **MyC 57:** Psicobiología de la obesidad
- **MyC 58:** El poder del bebé
- **MyC 59:** Las huellas del estrés
- **MyC 60:** Evolución del pensamiento
- **MyC 61:** TDAH
- **MyC 62:** El legado de Freud
- **MyC 63:** ¿Qué determina la inteligencia?
- **MyC 64:** Superstición
- **MyC 65:** Competición por el cerebro
- **MyC 66:** Estudiar mejor
- **MyC 67:** Hombre y mujer
- **MyC 68:** La hipnosis clínica
- **MyC 69:** Cartografía cerebral
- **MyC 70:** Pensamiento creativo
- **MyC 71:** El cerebro bilingüe
- **MyC 72:** Musicoterapia

(*) Disponible solo en formato digital



TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

- **T-1:** Grandes matemáticos *
- **T-2:** El mundo de los insectos *
- **T-3:** Construcción de un ser vivo *
- **T-4:** Máquinas de cómputo
- **T-5:** El lenguaje humano *
- **T-6:** La ciencia de la luz
- **T-7:** La vida de las estrellas
- **T-8:** Volcanes
- **T-9:** Núcleos atómicos y radiactividad
- **T-10:** Misterios de la física cuántica *
- **T-11:** Biología del envejecimiento *
- **T-12:** La atmósfera
- **T-13:** Presente y futuro de los transportes
- **T-14:** Los recursos de las plantas
- **T-15:** Sistemas solares
- **T-16:** Calor y movimiento
- **T-17:** Inteligencia viva
- **T-18:** Epidemias
- **T-19:** Los orígenes de la humanidad *
- **T-20:** La superficie terrestre
- **T-21:** Acústica musical
- **T-22:** Trastornos mentales
- **T-23:** Ideas del infinito
- **T-24:** Agua
- **T-25:** Las defensas del organismo
- **T-26:** El clima
- **T-27:** El color
- **T-28:** La consciencia *
- **T-29:** A través del microscopio
- **T-30:** Dinosaurios
- **T-31:** Fenómenos cuánticos
- **T-32:** La conducta de los primates
- **T-33:** Presente y futuro del cosmos
- **T-34:** Semiconductores y superconductores
- **T-35:** Biodiversidad
- **T-36:** La información
- **T-37:** Civilizaciones antiguas
- **T-38:** Nueva genética
- **T-39:** Los cinco sentidos
- **T-40:** Einstein
- **T-41:** Ciencia medieval
- **T-42:** El corazón
- **T-43:** Fronteras de la física
- **T-44:** Evolución humana
- **T-45:** Cambio climático
- **T-46:** Memoria y aprendizaje
- **T-47:** Estrellas y galaxias
- **T-48:** Virus y bacterias
- **T-49:** Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
- **T-50:** Newton
- **T-51:** El tiempo *
- **T-52:** El origen de la vida *
- **T-53:** Planetas
- **T-54:** Darwin
- **T-55:** Riesgos naturales
- **T-56:** Instinto sexual
- **T-57:** El cerebro, hoy
- **T-58:** Galileo y su legado
- **T-59:** ¿Qué es un gen?
- **T-60:** Física y aplicaciones del láser
- **T-61:** Conservación de la biodiversidad
- **T-62:** Alzheimer
- **T-63:** Universo cuántico *
- **T-64:** Lavoisier, la revolución química
- **T-65:** Biología marina
- **T-66:** La dieta humana: biología y cultura
- **T-67:** Energía y sostenibilidad
- **T-68:** La ciencia después de Alan Turing
- **T-69:** La ciencia de la longevidad
- **T-70:** Orígenes de la mente humana
- **T-71:** Retos de la agricultura
- **T-72:** Origen y evolución del universo
- **T-73:** El sida
- **T-74:** Taller y laboratorio
- **T-75:** El futuro de la energía (I)
- **T-76:** El futuro de la energía (II)
- **T-77:** El universo matemágico de Martin Gardner
- **T-78:** Inteligencia animal
- **T-79:** Comprender el cáncer
- **T-80:** Grandes ideas de la física

(*) Disponible solo en formato digital





MENTE y CEREBRO Cuadernos

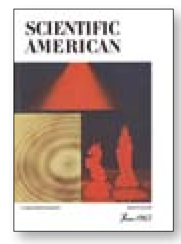
Precio por ejemplar: 6,90 €

- **Cuadernos 1:** El cerebro
- **Cuadernos 2:** Emociones
- **Cuadernos 3:** Ilusiones
- **Cuadernos 4:** Las neuronas
- **Cuadernos 5:** Personalidad, desarrollo y conducta social
- **Cuadernos 6:** El mundo de los sentidos
- **Cuadernos 7:** El sueño
- **Cuadernos 8:** Neuroglía
- **Cuadernos 9:** La memoria
- **Cuadernos 10:** Adicciones





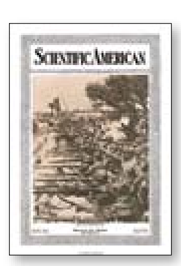
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Junio 1965

Dentro de la Tierra

«La extrapolación de los resultados de nuestros experimentos con hierro y níquel mezclados en una proporción de 90:10 indican que, bajo las elevadas presiones y temperaturas que supuestamente imperan en el núcleo del planeta, la densidad de esa aleación es del orden del 10 por ciento inferior a la del hierro puro. Nuestros valores concuerdan con el de la densidad del núcleo calculada por K. E. Bullen, de la Universidad de Sídney, y Francis Birch, de la Universidad Harvard, basándose en datos sísmicos, el momento de inercia y la masa de la Tierra. Concluimos, pues, que el núcleo terrestre está formado probablemente por una mezcla de hierro y níquel de composición similar a la de los meteoritos.»



Junio 1915

¿El invento más trascendental?

«El hecho más importante en la historia de los logros humanos es el invento de la máquina de vapor. Su aparición dividió la memoria del tiempo en dos eras claramente definidas; y bien podría decirse que toda la historia de los avances fundamentales puede referenciarse, hacia adelante o hacia atrás, a partir de ese hecho relativamente reciente. El salto del trabajo manual a la máquina, que representa a ambas eras, fue todo un cataclismo que alteró y removió en profundidad al género humano en todas sus relaciones, hasta unos extremos inconcebiblemente mayores que cualquiera de los cambios políticos o decisiones militares citados por los historiadores para señalar el inicio de una nueva época.»

Septuagésimo aniversario de *Scientific American*

«Si pensamos que cuando apareció *Scientific American* un mensaje de Nueva York a Liverpool tardaba tres semanas, y a Calcuta tres meses; si pensamos que hasta ayer mismo nos maravillaban la aplicación del éter y el cloroformo en la cirugía, la proeza de la telegrafía transoceánica sin hilos, la magnitud del canal de Panamá, la posibilidad de ver el esqueleto humano tras los tejidos gracias a los rayos X, y el espectáculo del hombre volando por los aires más rápido que las aves; si pensamos en que hemos tenido el privilegio no solo de presenciar esos y muchos otros milagros, sino de trasladarlos a la imprenta, ¿quién nos reprochará que contemplemos algo sobrecogidos nuestra labor futura?»



Junio 1865

Dentro de la Tierra

«Sres. de la redacción: Les presento, por mi parte, una auténtica idea "áurea". A saber, que el interior de la Tierra está abundantemente abastecido, sino exclusivamente compuesto, de oro, platino y otros metales preciosos. Si solo por un instante suponemos que el planeta estuvo una vez en estado gaseoso o líquido, ¿no es obvio que esas sustancias, de dificilísima fusión y de los máximos pesos específicos, serían las primeras en hallar camino hacia el centro? El oro, el platino y algunos metales preciosos más poseen esas propiedades en grado superior a las demás sustancias conocidas, y aunque sabemos que escasean en la superficie terrestre, nada nos asegura que no abunden en la naturaleza.

—John Calvin Moss»

El comunicante inventó el primer proceso operativo de fotograbado para impresión.

Los arados y el motor de vapor

«Se han hallado dificultades en la aplicación de la máquina de vapor a la agricultura. Enganchar la máquina al apero, del mismo modo que se hace con el caballo, resultó inadecuado con el motor de vapor. Este perdía potencia al mover tan pesada masa por las irregularidades del terreno y comprimía la tierra destinada al cultivo. Por ello, fue necesaria una soga tirada por el motor para arrastrar el apero.»

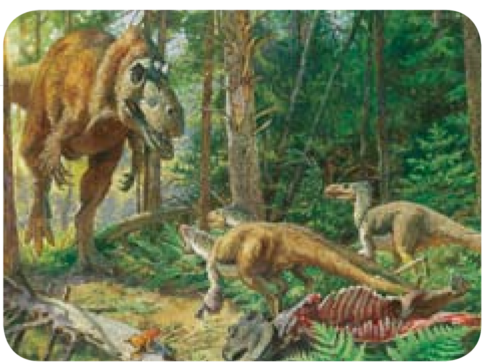
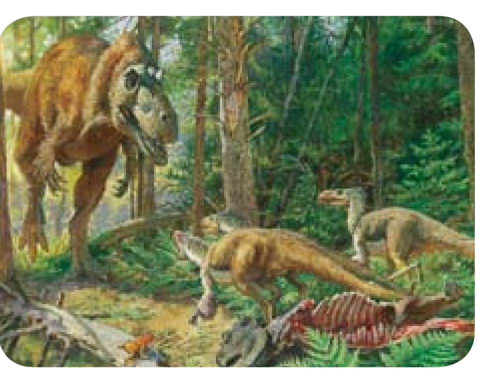


MIRADA A LA CIVILIZACIÓN después de 70 años de invenciones, 1915.

Ingrediente del barniz

«El mejor y más puro copal se encuentra en el continente africano, cerca de Zanzíbar. Se trata, sin duda, de una resina fósil que los africanos extraen de la tierra y llevan en pequeñas cantidades a los comerciantes indios para venderla. Al llegar a Zanzíbar, se halla en un estado de gran suciedad y requiere mucho cernido y depurado antes de que pueda comercializarse; se enjuaga luego con una solución de sosa y cal y, tras disponerse cuidadosamente en cajas, está lista para el mercado interior. Que se trata de una resina puede demostrarlo su superficie áspera o de "carne de gallina", que seguramente corresponde a la impronta de la arena o la tierra cuando la sustancia fluyó árbol abajo en su estado viscoso. También se observan piezas con ramitas, hojas e insectos muy bien conservados en su interior.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXII, N.º 23, 5 DE JUNIO DE 1915

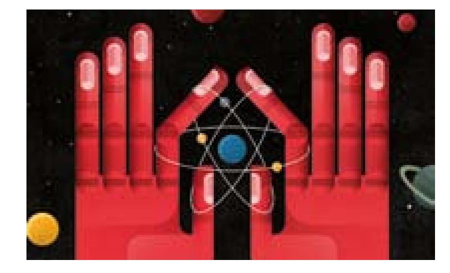



PALEONTOLOGÍA

El renacimiento de los tiranosaurios

Stephen Brusatte

Nuevos hallazgos ponen a *T. rex* en su lugar.



FÍSICA DE PARTÍCULAS

La extraña vida de los gluones

Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan

El comportamiento de las partículas elementales encargadas de la cohesión íntima de la materia constituye todavía un misterio.

MEDICINA

Una iniciativa para prevenir el alzhéimer

Gary Stix

Un grupo de familias colombianas afectadas por una rara forma hereditaria de la enfermedad se ha convertido en protagonista del ensayo clínico de un tratamiento presintomático.



AGRICULTURA

¿Cómo afecta el cambio climático al vino?

Kimberly A. Nicholas

El calentamiento del planeta está alterando la composición de las uvas. Si los viticultores quieren conservar el sabor del vino, tendrán que adaptar los viñedos.

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *El norte se apropia de las tierras del sur* y *El impacto ecológico de la catástrofe de Fukushima*; Juan Pedro Adrados: *Nuevas aplicaciones de la sonificación* y *Máquinas de Van der Waals y de Casimir*; Guzmán Sánchez: *Medicina bioelectrónica* y *Nanotecnología para diagnosticar y curar enfermedades*; Luis Cardona: *Hacia una acuicultura más sostenible*; Alberto Ramos: *Sobrevivir en la ciberguerra*; Xavier Roqué: *El precursor olvidado de la epigenética*; Javier Grande: *El enigma de los púlsares ausentes*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España